

JULIANA LORENSI DO CANTO

COLHEITA MECANIZADA DE BIOMASSA FLORESTAL PARA ENERGIA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

C232c
2009

Canto, Juliana Lorensi do , 1978-
Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia /
Juliana Lorensi do Canto. – Viçosa, MG, 2009.
x, 127f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Carlos Cardoso Machado.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Colheita florestal. 2. Biomassa florestal. 3. Mecanização
florestal. 4. Resíduos vegetais. 5. Biocombustíveis.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt CDD 634.931

JULIANA LORENSI DO CANTO

COLHEITA MECANIZADA DE BIOMASSA FLORESTAL PARA ENERGIA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 09 de dezembro de 2009.

Prof. Fernando Seixas
(Co-orientador)

Prof. Amaury Paulo de Souza
(Co-orientador)

Prof. Márcio Lopes da Silva

Prof. Cleverson de Mello Sant'Anna

Prof. Carlos Cardoso Machado
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos às instituições e pessoas que viabilizaram a realização deste trabalho, especialmente:

- À Universidade Federal de Viçosa, pelas oportunidades.
- Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, pela possibilidade de realização do curso de doutorado, e à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, pela possibilidade de realização do estágio de doutoramento no exterior.
- Ao Professor Carlos Cardoso Machado, pela oportunidade e orientação.
- Ao Professor Fernando Seixas, pelo apoio e pela orientação.
- Aos Professores Amaury Paulo de Souza e Luciano José Minette, pela orientação.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro no doutorado e no estágio de doutoramento no exterior.
- Ao Dr. Robert Rummer, líder de projetos do USDA Forest Service, Southern Research Station, Auburn, Alabama, Estados Unidos, pela oportunidade de realização do estágio de doutoramento e pela gentileza com a qual me recebeu.
- À equipe do USDA Forest Service, Southern Research Station, Auburn, Alabama, Estados Unidos, pelo apoio e pela gentileza com a qual me receberam.
- À Empresa Jari Celulose, na pessoa de Pablo Guzzo, pelo apoio disponibilizado.
- Aos membros da Banca Examinadora, Professores Márcio Lopes da Silva e Cleverson de Mello Sant’Anna, pelas sugestões.
- Aos meu pais, por todo apoio dispensado nessa longa trajetória acadêmica.
- Ao Alencar Garlet, por ter estado sempre comigo.
- Aos meus amigos, pela colaboração, pelo apoio e pela amizade.

CONTEÚDO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. A questão da energia	3
2.2. Biomassa florestal	8
2.3. Tecnologias disponíveis para conversão de biomassa florestal em energia	10
2.3.1. Processos termoquímicos	10
2.3.1.1. Combustão direta	10
2.3.1.2. Pirólise	12
2.3.1.3. Gaseificação	12
2.3.1.4. Liquefação	15
2.3.2. Processos biológicos	15
2.4. Resíduos florestais	17
2.4.1. Resíduos da colheita florestal	17
2.4.1.1. Cavaqueamento	19
2.4.1.1.1. Picadores	20
2.4.1.1.2. Trituradores	21
2.4.1.1.3. Cavaqueamento em um sistema de toras curtas	21
2.4.1.1.4. Cavaqueamento em um sistema de árvores inteiras	27
2.4.1.1.5. Estoque de cavacos	28
2.4.1.2. Enfardamento	30
2.4.1.3. Compactação de biomassa florestal em veículos de transporte	32

2.4.2. Desbastes.....	33
2.4.3. Tocos e raízes.....	34
2.4.4. Estoque e secagem de resíduos florestais.....	39
2.5. Florestas energéticas	40
2.5.1. Sistema de colheita de árvores inteiras	42
2.5.2. Colhedoras agrícolas adaptadas	44
2.5.3. Enfardadoras	45
2.6. Arbustos e árvores de baixo diâmetro.....	47
2.7. Impactos ambientais da geração de energia a partir da biomassa florestal.....	49
2.7.1. Exportação de nutrientes.....	49
2.7.2. Balanço energético.....	55
3. REFERÊNCIAS.....	57
AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE CAVAQUEAMENTO DE PONTEIRAS DE EUCALIPTO PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO.....	67
RESUMO.....	67
ABSTRACT.....	67
1. INTRODUÇÃO	68
2. MATERIAL E MÉTODOS	69
2.1. Área do estudo	69
2.2. Descrição da colheita de madeira.....	70
2.3. O sistema de cavaqueamento avaliado.....	71
2.4. Coleta de dados	72
2.4.1. Eficiência operacional e produtividade do sistema.....	73
2.4.2. Estudo de tempos dos ciclos operacionais	73
2.4.3. Consumo de combustível	74
2.4.4. Custos.....	75
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
3.1. Eficiência operacional e produtividade do sistema.....	75
3.2. Estudo de tempos dos ciclos operacionais	78
3.2.1. Autocarregável	78
3.2.2. Carregadora.....	79
3.3. Consumo de combustível e balanço energético	80
3.4. Custos.....	81
4. CONCLUSÕES	82
AGRADECIMENTOS.....	83

REFERÊNCIAS	83
AVALIAÇÃO DE DOIS SISTEMAS DE COLHEITA E ENFARDAMENTO DE BIOMASSA FLORESTAL	85
RESUMO	85
ABSTRACT	85
1. INTRODUÇÃO	86
2. MATERIAL E MÉTODOS	88
2.1. Áreas do estudo	88
2.2. Sistemas avaliados	89
2.3. Coleta de dados	91
2.3.1. Desempenhos	91
2.3.2. Fardos	92
2.3.3. Consumo de combustível	93
2.3.4. Custos	93
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
3.1. Desempenho dos sistemas avaliados	94
3.1.1. Site 1	94
3.1.2. Site 2	95
3.1.3. Site 3	96
3.2. Consumo de combustível	97
3.3. Fardos	98
3.4. Custos e benefícios	100
4. CONCLUSÕES	103
AGRADECIMENTOS	103
REFERÊNCIAS	104
REMOÇÃO E CAVAQUEAMENTO DE ÁRVORES COMPLETAS	106
RESUMO	106
ABSTRACT	106
1. INTRODUÇÃO	107
2. MATERIAL E MÉTODOS	108
2.1. Descrição da área de trabalho	108
2.2. Sistema de colheita observado	108
2.3. Coleta de dados	110
2.4. Custos	111
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	113

3.1. Etapa de remoção	113
3.2. Etapa de cavaqueamento	113
3.3. Qualidade dos cavacos	114
3.4. Custos.....	115
4. CONCLUSÕES	116
AGRADECIMENTOS.....	117
REFERÊNCIAS.....	117
4. CONCLUSÃO GERAL	119
5. RECOMENDAÇÃO	120
ANEXO.....	121

RESUMO

CANTO, Juliana Lorensi do, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2009. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. Orientador: Carlos Cardoso Machado. Co-orientadores: Fernando Seixas, Amaury Paulo de Souza e Luciano José Minette.

A crescente demanda por fontes alternativas de energia, em especial as renováveis, tem colocado em evidência a utilização da biomassa florestal como insumo energético. De modo geral, o desenvolvimento econômico e as questões ambientais são os principais motivadores do interesse pelas fontes renováveis. Contudo, as principais barreiras existentes para a maior utilização das fontes renováveis são de ordem econômica. Considera-se que um dos fatores mais importantes na utilização da biomassa florestal como insumo energético refere-se ao custo de colheita e transporte. Por isso, esse trabalho teve como objetivo analisar sistemas mecanizados de colheita de biomassa florestal para energia. O trabalho foi dividido em três artigos. O primeiro artigo teve como objetivo avaliar o desempenho e estimar os custos de um sistema de cavaqueamento de ponteiros de eucalipto, considerados resíduos da colheita florestal. O sistema foi composto por um picador florestal, dois tratores florestais autocarregáveis (com grua) e uma carregadora frontal. O trabalho foi realizado em uma empresa de base florestal, localizada no Estado do Pará, na Região Norte do Brasil. O sistema apresentou produtividade média de 17,51 t/he e produziu entre 94 e 162 vezes mais energia do que consumiu. O custo foi de R\$ 376,56/he (R\$ 21,51/t ou R\$ 2,70/GJ). O segundo artigo teve como objetivo avaliar o desempenho e estimar os custos de dois sistemas de

colheita e enfardamento de biomassa florestal de baixo diâmetro. Um sistema foi composto por um protótipo de uma colhedora-picadora-enfardadora. O outro sistema requereu duas operações sucessivas e foram avaliados dois modelos tratores florestais trituradores e uma enfardadora agrícola. A avaliação foi realizada em três diferentes áreas localizadas em *Osceola National Forest*, no Estado da Flórida, na Região Sul dos Estados Unidos. Na área considerada mais representativa da vegetação local, o protótipo enfardou 8,05 t/ha, enquanto que o sistema trator-enfardadora enfardou 9,75 t/ha (43 e 52% da biomassa disponível na área, respectivamente). A capacidade de produção foi de 0,30 ha/he para o protótipo e 0,51 ha/he para sistema trator-enfardadora. Os sistemas produziram entre 36 e 56 vezes mais energia do que consumiram e o custo foi de US\$ 39,86/t (US\$ 3,40/GJ) para o protótipo e de US\$ 37,60/t a US\$ 61,21/t (US\$ 3,23/GJ a US\$ 5,25/GJ) para o sistema trator-enfardadora. O terceiro artigo teve como objetivo analisar um sistema de remoção e cavaqueamento de árvores completas, composto por escavadora hidráulica com grua de demolição, trator de esteiras, carregadora frontal, grua hidráulica e triturador florestal. O trabalho foi realizado em uma área localizada em *Fort Benning*, no Estado da Georgia, na Região Sul dos Estados Unidos. A produtividade da remoção das árvores completas foi de 579,3 m²/he e a do cavaqueamento foi de 28,01 t/he. O sistema produziu 35 vezes mais energia do que consumiu e o custo foi de US\$ 565,14/he (US\$ 20,18/t ou US\$ 2,14/GJ). A escolha do sistema de colheita mais adequado e a viabilidade econômica da colheita mecanizada de biomassa florestal para energia vão depender do contexto local, da disponibilidade de plantas industriais capazes de consumir essa biomassa, da distância de transporte da biomassa e de opções e preços locais de outros combustíveis.

ABSTRACT

CANTO, Juliana Lorensi do, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2009.
Mechanical harvesting of forest biomass for energy. Adviser: Carlos Cardoso Machado. Co-advisers: Fernando Seixas, Amaury Paulo de Souza and Luciano José Minette.

The increasing demand for alternative energy sources, especially renewables, has raised the use of forest biomass as energy. In general, economic development and environmental issues are the main causes of the interest in renewable sources. However, the main barriers to greater use of renewable sources are the economic order. It is considered that one of the most important factors in the use of forest biomass as energy refers to the cost of harvesting and transportation. Therefore, this study aimed to analyze mechanized systems for harvesting forest biomass for energy. The study was divided into three papers. The first paper evaluated the performance and estimated costs of a wood chipping system for comminuting tree tops, which are considered residues from wood harvesting. The system was comprised by a wood chipper, two forest tractors equipped with knuckleboom grapple and one front loader. It was developed in a forest industry in the Para State, located in the North Region of Brazil. System average productivity was 17.51 tonnes per effective hour. The system produced between 94 and 162 times more energy than consumed. Cost per effective hour was R\$ 376.56 (US\$ 21.51/tonne of chips or R\$ 2.70/GJ). The second paper evaluated the performance and estimated costs of two systems for harvesting and baling low diameter forest biomass. One system was a cutter-shredder-baler prototype. The other system required two successive operations, being assessed two mulcher tractors and an agricultural round

baler. Machines were evaluated in three different areas on the Osceola National Forest in Florida, Southern Region of the United States. On the most representative site, the prototype recovered 8.05 green tonnes/ha while the mulcher and the agricultural baler recovered 9.75 green tonnes/ha (43 and 52% of available biomass, respectively). The production capacity was 0.30 ha/h for the prototype and 0.51 ha/h for the mulcher-baler system. The systems produced between 36 and 56 times more energy than consumed. Cost was US\$ 39.86/t (US\$ 3.40/GJ) for the prototype and between US\$ 37.60/t and US\$ 61.21/t (US\$ 3.23/GJ and US\$ 5.25/GJ) for the mulcher-baler system. The third paper analyzed a system for harvesting and hogging complete trees. The system was comprised of hydraulic excavator equipped with demolition grapple, bulldozer, front loader, knuckleboom loader and wood hog. The study was conducted in an area located at Fort Benning, Georgia State, Southern Region of the United States. Productivity of the complete trees extraction was 579.3 m²/h and of the complete trees hogging was 28.01 t/h. The system produced 35 times more energy than consumed. Cost was US\$ 565.14/h (US\$ 20.18/t or US\$ 2.14/GJ). The choice for a suitable system and the economic feasibility of mechanical harvesting of forest biomass for energy will depend on the local context, the availability of power plants capable of consuming the biomass, the transport distance and other fuels local price.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A crescente demanda por fontes alternativas de energia, em especial as renováveis, tem colocado em evidência a utilização da biomassa florestal como insumo energético. De um modo geral, o desenvolvimento econômico e as questões ambientais são os principais motivadores para o crescente interesse pelas fontes renováveis e tentativas de mudanças no setor energético.

No Brasil, a participação das fontes renováveis na oferta interna de energia têm aumentado nessa última década, representando atualmente 45,3% da matriz energética brasileira. Deste percentual de energia renovável, 25,6% correspondem à energia de biomassa de origem florestal (lenha e carvão vegetal). A biomassa florestal representa, portanto, a quarta fonte de energia da matriz nacional (depois do petróleo, da cana-de-açúcar e da energia hidráulica). A quantidade de lenha consumida para fins energéticos no Brasil foi de 94 milhões de toneladas em 2008 (BRASIL, 2009).

O uso da biomassa florestal como insumo energético é uma tendência mundial e vem despertando interesse tanto de países em desenvolvimento, como de países desenvolvidos e industrializados. A utilização energética da biomassa florestal, nas suas diversas formas de aproveitamento, vem ganhando destaque por suas características renováveis; pela possibilidade de redução da dependência de combustíveis fósseis; redução de emissões atmosféricas; descentralização da produção e auto-suficiência energética; geração de oportunidades de trabalho no processo de produção e conversão energética; e criação de novos mercados para os resíduos florestais.

A utilização energética da biomassa florestal também promove o aumento do aproveitamento de florestas comerciais existentes, pela possibilidade de utilização dos

resíduos florestais, que geralmente são deixados no campo após a colheita e se constituem em potenciais fontes de energia. Além disso, o aproveitamento energético de resíduos florestais pode viabilizar economicamente atividades de manejo florestal e tratamentos silviculturais.

Contudo, as principais barreiras existentes para a maior utilização das energias renováveis são de ordem econômica (GOLDEMBERG, 1998). Considera-se que um dos fatores mais importantes na utilização da biomassa como insumo energético, independente da técnica empregada, refere-se ao custo de colheita e transporte dessa matéria-prima (MACEDO, 2001). Quando os custos de produção da biomassa florestal são comparados com os de outras formas de produção de energia, constata-se que os custos de colheita e transporte são determinantes para a sua competitividade.

Para que essa barreira possa ser superada, são necessários estudos e investimentos em tecnologia de colheita, para que ganhos de escala possam ser alcançados, de forma a tornar a biomassa florestal competitiva, uma vez que já existem tecnologias para a sua conversão energética (GOLDEMBERG, 1998).

Acrescenta-se ainda que os sistemas de colheita de biomassa florestal devem buscar concentrar o material, visando aumentar a sua densidade e reduzir os custos de transporte. Uma vez concentrada a biomassa florestal, seu aproveitamento poderá ser economicamente viabilizado (MARTÍ, 2006).

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo geral analisar técnica e economicamente sistemas mecanizados de colheita de biomassa florestal para energia. Objetivou-se, especificamente:

- Estudar tecnologias utilizadas na colheita de biomassa florestal;
- Analisar aspectos técnicos de três sistemas mecanizados de colheita de biomassa florestal e determinar suas produtividades;
- Estimar os custos dos sistemas estudados;
- Determinar o balanço energético dos sistemas estudados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A questão da energia

A valorização da biomassa como insumo energético teve início na década de 1970 com as crises do petróleo. Na ocasião, a biomassa passou a ser considerada como alternativa viável para atendimento às demandas por energia térmica e de centrais elétricas de pequeno e médio porte. Entretanto, na metade da década de 1980, o preço do petróleo começou a despencar, diminuindo o interesse em energias alternativas. Mais tarde, na década de 1990, a biomassa voltou a ganhar destaque no cenário energético mundial devido ao desenvolvimento de tecnologias mais avançadas de transformação, pela ameaça de esgotamento de reservas de combustíveis fósseis e pela incorporação definitiva da temática ambiental nas discussões sobre desenvolvimento sustentável (MÜLLER, 2005; COUTO e MÜLLER, 2008).

A partir do final da década de 1990, iniciativas para o uso da biomassa florestal em sistemas de co-geração¹ vêm aumentando, inclusive com o ingresso no mercado de empresas que têm como objetivo principal gerar energia a partir deste sistema, e não manufaturar produtos da madeira (BRAND, 2007).

Em 2001, a crise energética brasileira evidenciou ainda mais a necessidade de diversificação e expansão da matriz energética brasileira. A geração de eletricidade no Brasil baseia-se principalmente em grandes e médios empreendimentos hidroelétricos, e a crise de eletricidade foi causada pela baixa ocorrência de chuvas naquele período,

¹ Geração simultânea de energia térmica e mecânica a partir de uma mesma fonte primária de energia. A energia mecânica pode ser utilizada na fonte de trabalho (movimentar máquinas e equipamentos) ou transformada em energia elétrica através de gerador de eletricidade e a energia térmica é utilizada como fonte de calor para um processo (COELHO, 1999).

afetando as hidrelétricas, e pela falta de investimentos na capacidade de geração e transmissão da energia hidrelétrica. Entre 1990 e 2000, a produção de eletricidade teve um aumento médio anual de 4,6%, enquanto que a capacidade instalada aumentou apenas 3,1%. Como consequência, os reservatórios de água baixaram e o sistema ficou dependente da quantidade anual de chuvas (IEA, 2003).

Esta crise foi resolvida com um programa de racionamento que durou 10 meses, oficialmente decretado entre 01 de junho de 2001 e 01 de março de 2002, e que teve um profundo efeito no setor elétrico e na economia brasileira (IEA, 2003).

Para o futuro, estima-se que a participação percentual da energia hidráulica não terá grandes possibilidades de aumento, pois para as regiões Sul, Sudeste e Nordeste, o potencial de geração através das grandes usinas hidrelétricas encontra-se praticamente esgotado (LIMA, 1992). Acredita-se que os investimentos em hidrelétricas serão grandes desafios para os próximos anos. Isto porque construções de novas hidrelétricas poderão ser inviáveis, uma vez que os recursos hídricos remanescentes estão localizados longe dos grandes centros consumidores, o que requer grandes investimentos em linhas de transmissão. As considerações ambientais também poderão ter grande impacto na expansão hidrelétrica, uma vez que grande parte do potencial remanescente está na região Amazônica (IEA, 2003).

Diante da gravidade do problema, medidas emergenciais foram tomadas pelo governo, dentre as quais destacam-se a revisão normativa do modelo do sistema elétrico brasileiro, representado pela promulgação da Lei 10.848/04; a criação da Empresa de Planejamento Energético (EPE), pela Lei 10.847/04; a criação do PROINFA, através da Lei 10.438/02; e diversas ações inovadoras entre as quais cabe citar o Plano Nacional de Agroenergia do Ministério da Agricultura (GOMES et al., 2007).

O PROINFA² (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) previu, em sua primeira fase, assegurar a participação de 3.300 MW de energia a partir de fontes renováveis. Na segunda fase, as energias renováveis deverão atender a 10% do consumo anual de energia elétrica no País em 20 anos. Para que a meta seja atingida, no mínimo 15% do incremento anual de energia elétrica deverá ser suprido pelas fontes renováveis. A finalidade do programa é aumentar a participação da energia elétrica gerada a partir de unidades de produção baseadas em biomassa, energia eólica e

² Instituído pela Lei 10.438, de 26 de abril de 2002, e revisado pela Lei 10.762, de 11 de novembro de 2003.

pequenas centrais hidrelétricas, oferecendo condições especiais de financiamento aos empreendedores (MME, 2009).

Com a iminência da crise da energia elétrica brasileira, o governo federal também implantou o Programa Prioritário de Termelétricidade (PPT)³, com a finalidade de incentivar o uso do gás natural e aumentar a oferta de energia. Mas, a expansão da geração termelétrica a gás tem esbarrado na garantia de suprimento de gás natural. A recente nacionalização das reservas de gás e a re-estatização de empresas do setor energético na Bolívia trouxeram incertezas ao mercado brasileiro de gás, que importa do país vizinho mais de 50% do gás consumido. Diante deste novo cenário, a Petrobras lançou o Plano de Antecipação da Produção de Gás (Plangás) para aumentar a produção de gás brasileira. Contudo, apesar dos planos de expansão da oferta de gás, existem incertezas quanto à segurança de abastecimento e quanto à política de preços e competitividade do gás em relação aos combustíveis concorrentes (LÓPEZ et al., 2008).

Outro fator determinante para as fontes energéticas renováveis foi a assinatura do Protocolo de Kyoto em 1998, onde ficou estabelecido que os países industrializados deverão promover reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa, indicando que a participação de energias renováveis tenderá a ocupar um lugar de destaque na matriz energética mundial (MÜLLER, 2005).

A utilização de fontes renováveis é uma medida que reduz a emissão de gases de efeito estufa. Cerca de 80% do consumo mundial de energia primária são baseados em combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) e a queima destes combustíveis é a principal responsável pela emissão de dióxido de carbono, um dos responsáveis pelo aquecimento global e pelas mudanças climáticas (GOLDEMBERG, 1998).

Visando aumentar a participação das energias renováveis na matriz energética mundial, a Iniciativa Brasileira de Energia (BEI) foi apresentada na Conferência Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (*World Summit on Sustainable Development*) em 2002 na África do Sul. A iniciativa propôs que todos os países aumentassem para 10% a participação das energias renováveis em suas matrizes energéticas até 2010. O estabelecimento de uma meta global de aumento das energias renováveis possibilitaria, além de mitigar os efeitos causadores nas mudanças climáticas globais, aliviar os problemas locais e transfronteiriços de poluição atmosférica pela gradual substituição dos combustíveis fósseis (LUCON e COELHO, 2002).

³ Instituído pelo Decreto nº 3.371, em 24 de fevereiro de 2000.

Naquele momento, a iniciativa não foi aceita devido à grande resistência imposta principalmente pelos Estados Unidos, Japão, Austrália, Índia, China e por países membros da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo), com exceção da Venezuela (GUARDABASSI, 2006). Apesar da proposta não ter sido aprovada, a importância e a urgência de se adotar as fontes renováveis de energia foram destacadas.

Em 2003, aconteceu em Brasília a Conferência Regional para a América Latina e o Caribe sobre Energias Renováveis. Essa reunião foi convocada pelo governo brasileiro, visando a aprovação da Plataforma Regional sobre Energias Renováveis, que foi apresentada na Conferência Internacional sobre Energias Renováveis (*Renewables* 2004), realizada na Alemanha. Desta reunião resultou um documento intitulado “Plataforma de Brasília”, no qual os países reafirmam a meta regional de 10% de energia renovável em sua matriz (GUARDABASSI, 2006).

Aumentar a diversificação da matriz energética de um país e reduzir sua dependência de combustíveis fósseis é uma medida estratégica importante para a garantia de suprimento de energia. Assim não se fica vulnerável às oscilações dos preços do petróleo e às instabilidades políticas dos países produtores (COELHO, 2005).

Nos próximos anos, acredita-se que o aumento do preço do petróleo não será fruto de crises cada vez mais frequentes e graves, mas sim resultado da demanda crescente, em razão do aumento da população e do consumo per capita, e da oferta limitada, em razão do limite geológico de suas reservas (CHAIZE, 2007).

Apesar da ameaça de esgotamento de reservas de combustíveis fósseis, estima-se que a demanda por energia pode dobrar ou triplicar até 2050, em função do crescimento populacional e expansão da economia (WBCSD, 2005). O consumo mundial de energia cresceu em média 2,2% ao ano entre 1850 e 1990, enquanto que a população mundial cresceu em média 1,1% ao ano neste mesmo período (GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003). Segundo projeções da IEA (2002), espera-se um crescimento médio de 1,6% ao ano na demanda mundial de petróleo entre 2000 e 2030. Entretanto, as projeções são maiores para os países em desenvolvimento. Para o Brasil, estima-se que a demanda por petróleo cresça 2,5% ao ano entre 2000 e 2030.

A população mundial passou de 2,5 bilhões de habitantes em 1950 a 6,5 bilhões de habitantes em 2006. Este aumento da população acompanhou-se de um aumento do consumo de petróleo. A produção mundial de petróleo em 1970 era de 48 milhões de barris por dia e de 83 milhões em 2004. De 1970 para 2004, a produção mundial de

petróleo adaptou-se ao aumento da população mundial, permanecendo em torno de 750-760 litros per capita ao ano (CHAIZE, 2007).

Porém, o consumo de petróleo mundial apresenta profundas desigualdades. Os Estados Unidos representam 4,6% da população mundial e consomem 24% da produção mundial de petróleo, ou seja, 10,5 litros de petróleo per capita ao dia. A Alemanha, a Inglaterra e a França representam 3,2% da população mundial e consomem 7,7% da produção mundial de petróleo, ou seja, 4,9 litros de petróleo per capita ao dia. Em contrapartida, a China representa 20% da população mundial (1,3 bilhões de habitantes) e consome 8% da produção mundial, ou seja, 0,83 litro de petróleo per capita ao dia (CHAIZE, 2007).

Nos países em desenvolvimento, o consumo de energia per capita é de 0,5 tonelada equivalente de petróleo (TEP) de energia comercial por ano, cerca de 10 vezes menor do que nos países industrializados. Como resultado disso, no fim da década de 1990, cerca de 30% de toda a energia comercial consumida no mundo (petróleo, gás natural, carvão, energia nuclear e hidrelétrica) foi utilizada nos países menos desenvolvidos, onde vivem três quartos da humanidade. Os 70% restantes da energia mundial foram utilizados pelas populações dos países industrializados, que constituem apenas 25% da população mundial (GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003).

Na década de 1970, em função da crise do petróleo, os países industrializados tiveram algum êxito em reduzir a sua dependência dos combustíveis fósseis por meio de melhorias na eficiência do uso de energia. Por outro lado, não é suficiente promover a eficiência energética nos países em desenvolvimento, uma vez que o crescimento no consumo de energia comercial nestes países é inevitável, devido à necessidade de se instalar infra-estrutura industrial, meios de transporte adequados e o crescimento urbano (GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003).

Conforme publicação do IEA (2006), mais de um quarto da população mundial ainda não têm acesso à eletricidade. Isso representa 1,6 bilhão de pessoas no mundo que não possuem acesso aos benefícios da energia elétrica. No Brasil, estima-se que entre 8 e 10 milhões de pessoas não possuem acesso à eletricidade.

Portanto, tendo em vista que a energia é um requisito essencial para o desenvolvimento econômico e social e que previsões indicam que a oferta de petróleo não atenderá a demanda da crescente população mundial, ressalta-se a necessidade de adoção de fontes alternativas de energia, especialmente renováveis. A questão do aquecimento global e das mudanças climáticas também evidencia a necessidade da

incorporação, no processo de desenvolvimento, de tecnologias eficientes e modernas de energias renováveis (GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003).

2.2. Biomassa florestal

O termo biomassa se refere, em sentido amplo, a qualquer tipo de matéria orgânica renovável de origem vegetal, animal ou procedente da transformação natural ou artificial da mesma. Esses materiais têm em comum a origem direta ou indireta do processo de fotossíntese, apresentando-se de maneira periódica e não limitada no tempo, ou seja, de forma renovável (VIANNA et al., 2000).

Do ponto de vista energético, biomassa é toda matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia. A energia da biomassa é proveniente da luz solar convertida em energia química, através da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos. Esta energia pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor (ANEEL, 2002).

Assim, a biomassa tem diversas origens, podendo ser obtida de vegetais lenhosos e não-lenhosos, de resíduos orgânicos (agrícolas, florestais, urbanos e industriais) e de biofluidos, como óleos vegetais. Estas diversas fontes podem ser abrangidas no aproveitamento energético da biomassa (CORTEZ et al., 2008).

A energia gerada pela biomassa florestal depende do seu poder calorífico e do seu conteúdo de umidade. O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa do combustível. No Sistema Internacional de Unidades (SI), o poder calorífico é expresso em joules por grama ou quilojoules por quilograma. Porém, a unidade mais usada para combustíveis sólidos é calorias por grama ou quilocalorias por quilograma, e para combustíveis gasosos é calorias por metro cúbico (INCE, 1977; QUIRINO, 2002).

Esta energia pode ser expressa como poder calorífico superior (PCS) ou poder calorífico inferior (PCI). O PCS é obtido a partir do combustível seco, enquanto que o PCI considera o conteúdo de água de constituição do combustível e o calor perdido com a vaporização da água. Portanto, o PCI retrata melhor a qualidade de um combustível (INCE, 1977; QUIRINO, 2002).

O calorímetro é utilizado na determinação do poder calorífico da biomassa florestal. Os valores assim obtidos correspondem ao PCS e são ligeiramente superiores

aos observados na prática porque o calorímetro é fechado e os produtos da combustão permanecem enclausurados. Assim, ao se resfriar, o vapor d'água é condensado e libera o calor latente de vaporização (PEREIRA JR, 2001).

O poder calorífico depende, principalmente, da composição química do combustível (INCE, 1977). Altos conteúdos de carbono e hidrogênio significam alto poder calorífico, enquanto oxigênio apresenta efeito contrário (PEREIRA JR, 2001).

A madeira de espécies coníferas, que contém mais extrativos do que as folhosas, geralmente apresenta PCS entre 4.700 e 6.600 kcal/kg, enquanto que a madeira de folhosas possui entre 4.400 e 5.800 kcal/kg (INCE, 1977). Estudos indicam que a resina presente em determinadas espécies tem poder calorífico médio de 9.460 kcal/kg. Assim, espécies com altos teores de resina (coníferas) apresentam maior poder calorífico do que espécies com baixos teores de resina (folhosas) (BRITO e BARRICHELO, 1979).

Em estudo de Quirino et al. (2004), o PCS da madeira de 258 espécies florestais variou entre 4.685 a 4.736 kcal, com média de 4.710 kcal/kg, sendo considerada uma propriedade pouco variável.

Porém, a umidade é talvez o fator que exerce maior influência sobre o uso da madeira para energia. A presença de água representa poder calorífico negativo, pois parte da energia liberada é gasta na vaporização da água, ou seja, antes de ocorrer a combustão, a água precisa evaporar. Além disso, se o conteúdo de água for muito variável, pode dificultar o processo de combustão, havendo necessidade de constantes ajustes no sistema (BRITO, 1986).

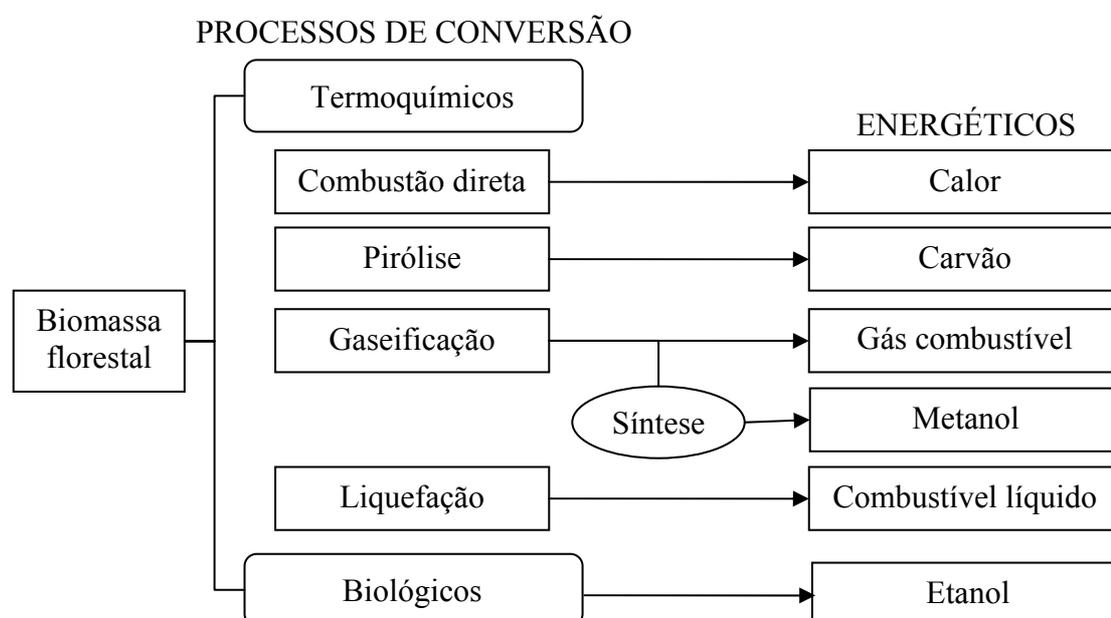
Além da umidade, a biomassa florestal também pode ser extremamente variável em relação às características físicas, tais como tamanho e forma das partículas e conteúdo de contaminantes não combustíveis, que influenciam na conversão energética. Os sistemas de conversão são ajustados para operar com um determinado tempo de retenção para cada tipo de combustível e, se as características do material não forem uniformes, a eficiência de conversão do sistema diminui (POTTIE e GUIMIER, 1985).

O tamanho e a forma das partículas do combustível afetam a taxa de conversão energética durante a queima de duas maneiras. Primeiro, partículas com tamanho e forma diferentes possuem diferentes superfícies de área por unidade de volume ou peso de combustível. Uma vez que as reações químicas ocorrem na superfície das partículas, a desuniformidade afeta a taxa de queima do material. Segundo, o tamanho e a forma das partículas do combustível determinam o fator de volume sólido, ou seja, a quantidade de espaços vazios por unidade de volume ou peso do material. Assim, a

quantidade de oxigênio presente nesses espaços vazios também afeta a taxa de queima do combustível (POTTIE e GUIMIER, 1985).

2.3. Tecnologias disponíveis para conversão de biomassa florestal em energia

As tecnologias de produção de eletricidade a partir da biomassa florestal podem ser divididas em dois grupos: (a) aquelas que fazem uso da biomassa como recurso energético primário, a partir de sua combustão direta, e (b) aquelas que fazem uso de combustíveis derivados através de processos termoquímicos (pirólise, gaseificação ou liquefação) ou biológicos (Figura 1) (BRIDGWATER, 2006).



Fonte: Adaptado de BRIDGWATER (2006).

Figura 1. Conversão energética da biomassa florestal.

2.3.1. Processos termoquímicos

2.3.1.1. Combustão direta

Combustão é a transformação da energia química dos combustíveis em calor, através das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido. Para fins energéticos, a combustão direta ocorre essencialmente em fogões (cocção de alimentos), fornos (metalurgia) e caldeiras (geração de vapor) (ANEEL, 2002).

A combustão direta da biomassa florestal em caldeiras ocorre em instalações baseadas em ciclos de potência a vapor (Ciclo Rankine), com queima exclusiva ou queima conjunta da biomassa com um outro combustível. No ciclo Rankine, uma caldeira com uma fonte de energia gera vapor em alta pressão, com temperatura superior ao ponto de ebulição da água. A liberação do vapor ocorre através de sistemas mecânicos, movimentando máquinas, transferindo calor para processos industriais, ou movimentando turbinas para gerar energia elétrica. O ciclo se completa com o retorno do vapor condensado à caldeira, para ser novamente aquecido (ODDONE, 2001).

As tecnologias dos ciclos a vapor são totalmente conhecidas e disponíveis comercialmente, representando um risco mínimo aos investidores (BRIDGWATER, 2003). A indústria brasileira produz equipamentos com custos altamente competitivos, existindo diversas plantas energéticas com ciclos a vapor em operação no Brasil (MACEDO, 2003).

O maior problema das centrais termelétricas que operam segundo o ciclo Rankine é a baixa eficiência, que não é competitiva com outras opções de geração. A eficiência do ciclo depende das condições termodinâmicas (pressão e temperatura) do vapor (VIANNA et al., 2000), sendo que em plantas menores, a eficiência gira em torno de 15%, atingindo 30% em plantas maiores e mais novas (BRIDGWATER, 2003).

A baixa eficiência de muitas centrais termelétricas em operação no Brasil se deve ao fato de que os custos unitários (R\$/kW instalado) são influenciados pelo efeito em escala e as centrais tendem a ter suas instalações simplificadas em função do elevado custo de transporte da biomassa, o que resulta na redução de sua eficiência. De uma forma geral, a reduzida eficiência das centrais térmicas a vapor alimentadas por biomassa é resultante das baixas pressões e temperaturas com que o vapor é gerado (para se reduzir o custo), da reduzida eficiência isentrópica das turbinas a vapor empregadas, da não utilização de reaquecimento e do baixo rendimento das caldeiras (COELHO, 1999). Para alcançar as eficiências mais elevadas, os ciclos a vapor necessitam de um complexo sistema de geração de vapor que inclui diversos trocadores de calor (CORRÊA NETO, 2001).

2.3.1.2. Pirólise

A pirólise é a etapa inicial do processo de carbonização e gaseificação, onde segue a oxidação total ou parcial da biomassa. Consiste em aquecer a biomassa a temperaturas moderadas (300-800°C), na ausência de oxigênio, até que o material volátil seja retirado. Como resultado, obtém-se gases e vapores orgânicos condensáveis, produtos líquidos (alcatrão e ácido pirolenhoso) e carvão (BRIDGWATER, 2006).

A relação entre a quantidade de biomassa e de cada produto varia de acordo com as características do processo e umidade do material de origem. O rendimento de cada produto depende basicamente do tempo de aquecimento e da temperatura. O processo, que é realizado com temperatura mais baixa e maior tempo de residência, favorece a produção de carvão. Alta temperatura e longo tempo de residência aumentam a conversão da biomassa em gás. Por outro lado, temperatura moderada e curto tempo de residência favorecem a produção de líquidos (BRIDGWATER, 2003) (Quadro 1).

Quadro 1. Rendimento dos produtos obtidos pelas variações da pirólise da madeira.

Variações	Temperatura	Tempo de residência	Líquido (%)	Carvão (%)	Gás (%)
Pirólise rápida	Moderada	Baixo	75	12	13
Carbonização	Baixa	Longo	30	35	25
Gaseificação	Alta	Longo	5	10	85

Fonte: BRIDGEWATER (2003).

2.3.1.3. Gaseificação

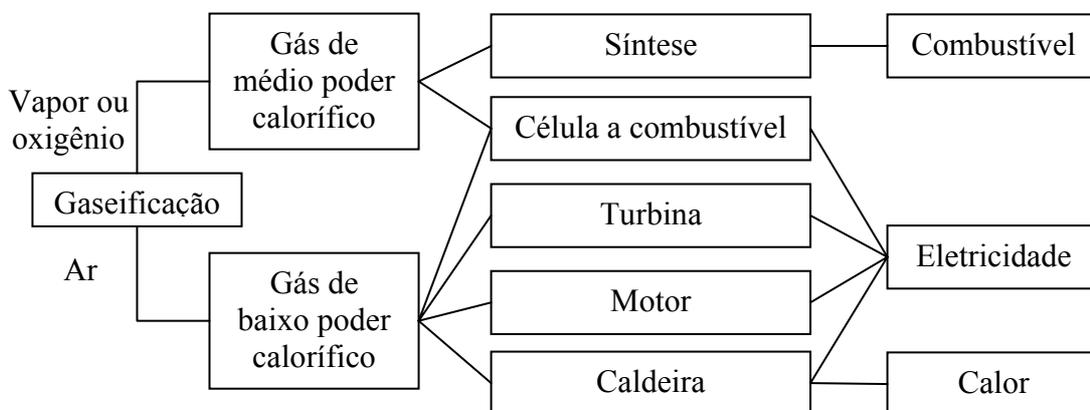
Gaseificação é um processo de conversão da biomassa em um gás combustível, através de sua oxidação parcial a temperaturas elevadas (acima das recomendadas no processo de pirólise), por meio de reações envolvendo agentes de gaseificação, como vapor quente, ar ou oxigênio, em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão) (BRIDGWATER, 2006; LORA et al., 2008).

No processo de gaseificação, ocorre inicialmente a pirólise. Em seguida, os produtos líquidos, sólidos e gasosos reagem com um agente oxidante, resultando gases permanentes, como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), gás hidrogênio (H₂) e menores quantidades de gases hidrocarbonetos. Através de diversas reações gás-sólido e gás-gás, o carbono sólido é oxidado em CO e CO₂, e H₂ é gerado a partir da água gasosa trocada na reação. Em seguida, na fase de redução, ocorre um

conjunto de reações típicas que originam os componentes combustíveis do gás produzido na ausência de oxigênio (BRIDGWATER, 2003).

A proporção da composição do gás resultante do processo de gaseificação varia de acordo com as condições do processo, particularmente se o agente oxidante é ar ou oxigênio. Também é influenciada pela composição da biomassa, pelo conteúdo de água, pela temperatura de reação e extensão da oxidação dos produtos da pirólise (BRIDGWATER, 2003).

O gás combustível resultante da gaseificação com injeção de ar possui baixo poder calorífico, entre 4 e 7 MJ/Nm³, sendo adequado para uso local, na queima direta em caldeira ou fornos, na alimentação de motores de combustão interna e turbinas. Entretanto, não é adequado para ser transportado ou para ser empregado como gás de síntese. Por sua vez, o gás combustível resultante da gaseificação com injeção de oxigênio ou vapor possui médio poder calorífico, entre 10 e 18 MJ/Nm³, podendo ser convertido em metanol (PEREIRA JR, 2001). De qualquer forma, a gaseificação da biomassa tem como vantagem a versatilidade de uso do combustível gerado (Figura 2).



Fonte: BRIDGWATER (2003).

Figura 2. Aplicações do gás de biomassa gaseificada.

O sistema gaseificação-combustão tem como vantagens sobre o sistema de combustão direta a maior eficiência energética e o fato de que as cinzas e o carbono residual permanecem no gaseificador, diminuindo assim a emissão de particulados. Além disso, o combustível resultante é mais limpo e, na maioria dos casos, não há necessidade de controle de poluição (NOGUEIRA, 1996).

A gaseificação também apresenta vantagens na geração de eletricidade em pequena escala, uma vez que o gás da biomassa pode ser utilizado diretamente em

motores de combustão interna, tanto a gasolina (Ciclo Otto) como a diesel (Ciclo Diesel). Por isso, a alternativa de gaseificação da biomassa para alimentação de motores de combustão interna vem sendo explorada em unidades de pequeno porte, geralmente em regiões que possuem restrições ao abastecimento elétrico via rede (PEREIRA JR, 2001; LORA et al., 2004).

Motores de combustão externa (*Stirling*) também oferecem a possibilidade de se utilizar qualquer tipo de combustível. O princípio de funcionamento do motor *Stirling* é baseado em um ciclo fechado, onde o gás de trabalho é mantido dentro dos cilindros e o calor é adicionado e removido do espaço de trabalho através de trocadores de calor. São de fácil operação e construídos em forma de unidades seladas, podendo ser instalados em regiões isoladas. A maior desvantagem é o seu alto custo (LORA et al., 2004).

O gás resultante da gaseificação da biomassa também pode ser utilizado para acionar turbinas a gás, que são máquinas motrizes de combustão interna. Um compressor pressiona ar para dentro da câmara de combustão na qual se forma uma mistura de ar comprimido e combustível que alimenta um processo de combustão contínua. O gás quente e pressurizado proveniente do combustor se expande na turbina, transformando energia térmica em energia mecânica. A energia liberada pelo combustível é diretamente transferida ao fluido de trabalho, composto pelo ar comprimido misturado aos gases de combustão, sem a necessidade de trocadores de calor para transferir energia entre a fonte de calor e o fluido de trabalho ou entre o fluido e o meio ambiente. A inexistência de volumosos trocadores de calor faz da turbina a gás um motor compacto e leve, fácil de transportar e instalar, e com menor custo (CORRÊA NETO, 2001; LORA et al., 2006).

O sistema de gaseificação da biomassa acoplado a uma turbina a gás é designado como BIG-GT (*Biomass Integrated Gasifier/Gas Turbine*). Os ciclos de geração termelétrica baseados em turbinas a gás encontram-se em estágio maduro de confiabilidade, possuem uma alta eficiência de conversão e apresentam reduzido impacto ambiental (CORRÊA NETO, 2001; LORA et al., 2004).

Outra possibilidade é usar o gás resultante da gaseificação para acionar células a combustível, que são dispositivos eletromecânicos, que convertem a energia química do combustível diretamente em energia elétrica, sem estágios intermediários de combustão e produção de energia mecânica. As células a combustível permitem a geração de eletricidade por oxidação eletroquímica de um combustível com o oxigênio do ar. Essa

opção tem uma alta eficiência de conversão e a possibilidade de operar em regime de co-geração, além de um impacto ambiental muito pequeno (LORA et al., 2004).

2.3.1.4. Liquefação

Liquefação da biomassa é a obtenção de líquidos (óleos) a partir de materiais lignocelulósicos (GONÇALVES et al., 2008). É um processo termoquímico para a obtenção de combustíveis líquidos, realizado a baixas temperaturas, altas pressões e com catalisadores para acelerar a reação e/ou provocar a seletividade do processo. O produto líquido obtido possui maior qualidade do que o obtido mediante o processo de pirólise. Com a liquefação, podem-se obter combustíveis com poder calorífico na faixa de 8.365 a 9.560 kcal/kg e com um conteúdo de oxigênio inferior a 15%. No entanto, há a necessidade de se trabalhar a altas pressões (VIANNA et al., 2000).

Os combustíveis líquidos oferecem várias vantagens, tais como elevada densidade energética, facilidade de transporte e estabilidade no manejo. Podem ser utilizados tanto em queimadores convencionais como industriais. Os processos de liquefação são capazes de produzir hidrocarbonetos que, apesar de diferentes dos hidrocarbonetos do petróleo, resultam em um combustível de boa qualidade (VIANNA et al., 2000). Entretanto, o processo de liquefação ainda é bastante sofisticado e oneroso.

2.3.2. Processos biológicos

Atualmente, tem-se produzido etanol por meio de processos biológicos a partir de cana-de-açúcar (no Brasil) e de milho (nos Estados Unidos), que perfazem 85% da produção mundial. Alguns países também utilizam a beterraba, o trigo e a mandioca. Mas, também é possível produzir etanol por meio de processos biológicos a partir de biomassa lignocelulósica (LYND et al., 1991; FRANÇA, 2008).

A biomassa lignocelulósica ou madeira é composta de polímeros de carboidratos (celulose e hemicelulose), lignina e uma pequena parte basicamente composta de extrativos, ácidos, sais e minerais. A celulose e a hemicelulose, que tipicamente compõem dois terços da massa seca, são polissacarídeos que podem ser hidrolisados em açúcar e fermentados em etanol. A lignina, por sua vez, não pode ser usada na produção de etanol, constituindo um resíduo do processo (HAMELINCK et al., 2005)

A conversão da biomassa celulósica em etanol passa pelas fases de pré-tratamento (solubilização e separação dos principais componentes da biomassa: celulose, hemicelulose, lignina e extrativos), hidrólise (que pode ser ácida ou enzimática), fermentação e destilação (GRAF e KOEHLER, 2000). Os métodos biológicos que podem ser empregados são diversos e diferem basicamente nos sistemas de hidrólise e fermentação empregados (LYND et al., 1991).

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas a respeito da conversão biológica de biomassa em etanol. Apesar disso, a produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica ainda requer métodos mais avançados de pré-tratamento, devido à dificuldade de viabilizar economicamente a hidrólise da celulose e hemicelulose em açúcar fermentável (GRAF e KOEHLER, 2000).

Isso porque a combinação da hemicelulose e da lignina provê um revestimento de proteção ao redor da celulose, o qual deve ser removido ou modificado para que possa ocorrer uma hidrólise eficiente. A estrutura da celulose a torna insolúvel e resistente. Então, para uma hidrólise economicamente viável, ainda são necessárias tecnologias mais avançadas de pré-tratamento (HAMELINCK et al., 2005).

O custo atual de produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica é o maior impedimento para a utilização desta tecnologia, não havendo, por isso, plantas em escala industrial. Porém, acredita-se que é uma tecnologia emergente e com grande potencial (LYND et al., 1991; GRAF e KOEHLER, 2000).

Apesar das tecnologias de fermentação de açúcar e amido estarem bastante desenvolvidas, há um certo limite em termos de uso de produtos agrícolas para a produção de etanol, tendo em vista a valoração de produtos alimentícios. Além disto, o rendimento de açúcar por hectare é baixo, comparado com produtos celulósicos (HAMELINCK et al., 2005). Por isso, acredita-se que o etanol de celulose pode vir a ser tão ou mais rentável que o etanol produzido com cana-de-açúcar (FRANÇA, 2008).

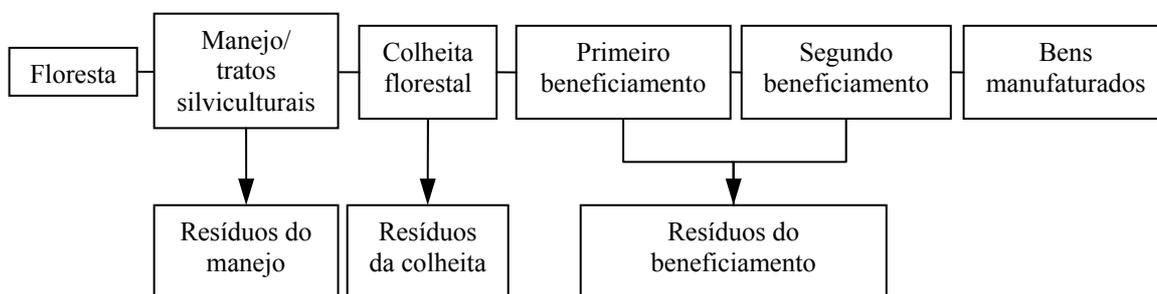
A expectativa na produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica é de se conseguir produzir até 36 litros de etanol para cada litro de gasolina empregado no processo de produção. No caso da cana-de-açúcar, para cada litro de gasolina utilizado na lavoura ou na indústria, são produzidos 9,2 litros de etanol (7.500 litros de etanol por hectare plantado de cana-de-açúcar). No caso do milho, essa relação cai para 1,4 litro de etanol para cada litro de combustível fóssil empregado no processo (3.000 litros de etanol por hectare de milho) (FRANÇA, 2008).

2.4. Resíduos florestais

A Portaria Normativa 302/84 do IBDF (atualmente IBAMA) conceituou resíduos florestais como sobras de material, que não o objeto prioritário da atividade, resultante da alteração sofrida pela matéria-prima florestal quando submetida à ação exterior através de processos mecânicos, físicos e/ou químicos.

O aproveitamento da biomassa florestal, desde a colheita até o beneficiamento em bens manufaturados, não é total, com as sobras geradas na cadeia produtiva florestal definidas como resíduos florestais (Figura 3).

Basicamente, os resíduos florestais podem ser classificados em resíduos do manejo florestal e tratos silviculturais (referentes a desbastes e desramas, geralmente realizados em florestas de *Pinus*, e desbrotas em florestas de *Eucalyptus*), resíduos da colheita florestal (galhos, topos, folhas, tocos, casca e outros resíduos) e resíduos do beneficiamento da madeira (gerados na indústria de base florestal, como cascas, resíduos de serrarias e indústrias de chapas de madeira, licor-negro⁴).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 3. Cadeia produtiva da biomassa florestal.

2.4.1. Resíduos da colheita florestal

Os resíduos resultantes das operações de colheita florestal geralmente são deixados na floresta por não possuírem aproveitamento, como galhos e ramos, parte superior da árvore, partes quebradas da árvore, toras que não atingiram dimensões mínimas de uso ou de valor comercial insuficiente que justifique a sua remoção.

⁴ Subproduto orgânico da produção de celulose pelo processo Kraft, que emprega uma solução de hidróxido de sódio e sulfato de sódio, para separar a celulose da madeira. Mais da metade da matéria-prima se solubiliza, resultando em licor-negro (NOGUEIRA e WALTER, 1996).

Infere-se que menos de dois terços de uma árvore são retirados da floresta para a comercialização, ou seja, cerca de 33% da massa de uma árvore são deixados na floresta por ocasião da colheita (FAO, 1990).

Uma quantificação dos resíduos resultantes da colheita mecanizada de toras de *Eucalyptus grandis* com diâmetro acima de 6 cm, com *Slingshot* e *Forwarder*, resultou em 16,17 m³/ha de madeira desperdiçada (4,5% do total) (BAUER, 2001).

Um estudo quantificou os resíduos da exploração madeireira de árvores com DAP igual ou superior a 45 cm, em três regiões no Norte de Mato Grosso. Os volumes médios de resíduos em cada região foram de 54,37m³/ha, 65,49 m³/ha e 199,68 m³/ha, representando, respectivamente, 48,35%, 45,43% e 85,97% do volume total de madeira. Os resíduos quantificados compreenderam troncos ou fustes sem condições de aproveitamento para serraria, com sapopemas bem pronunciadas, podres ou ocos, e troncos mortos, além de parte de árvores vivas que habitualmente são deixadas na floresta após a exploração, como galhos (FELFILI et al., 1984).

Uma estimativa realizada na exploração de toras de caixeta (*Tabebuia cassinoides*) com no mínimo 12 cm de diâmetro, no Estado de São Paulo, comprovou que somente 33% da madeira foram aproveitados (NOLASCO, 1997).

Além dos resíduos, há perdas de madeira durante as operações da colheita, que giram em torno de 8 e 10% (FAO, 1990). A quantidade de madeira utilizável perdida está presente em todas as fases da colheita florestal, desde o corte, a extração e o transporte, e este material representa uma significativa parte do total removido de uma floresta (JACOVINE, 2000).

Uma avaliação em cinco subsistemas de colheita de *Eucalyptus* concluiu que, na média, 5,9% da madeira aproveitável foi deixada na floresta após a colheita. Foram consideradas as perdas resultantes de falhas operacionais e do não atendimento às especificações de tamanho comercial (Quadro 2) (JACOVINE et al., 2001).

Quadro 2. Perda de madeira em diferentes subsistemas de colheita de *Eucalyptus*.

Subsistemas	Tamanho das toras aproveitadas		Perdas	
	Diâmetro mínimo	Comprimento	m ³ /ha	%
<i>Harvester + Forwarder</i>	4 cm	> 2,50 m	13,87	3,5
<i>Slingshot + Forwarder</i>	4 cm	> 2,50 m	14,29	3,6
Motosserra + Extração manual	6 cm	1,5 – 3,0 m	18,65	7,5
Motosserra + <i>Forwarder</i>	6 cm	1,5 – 3,0 m	22,76	9,1
Motosserra + Guincho	6 cm	1,5 – 3,0 m	14,10	5,6

Fonte: JACOVINE et al. (2001).

A densidade dos resíduos da colheita florestal varia de 130 a 180 kg/m³, para conteúdos de umidade entre 30 e 50% (LEINONEN, 2004). Por isso, um aspecto de crucial importância na colheita da biomassa florestal para geração de energia diz respeito à concentração deste material, tendo em vista solucionar problemas de manuseio, estoque e transporte. Uma vez concentrado o material, que onera os custos de transporte, seu aproveitamento poderá ser economicamente viabilizado (MARTÍ, 2006). Por esta razão, as tecnologias de colheita se baseiam na redução da biomassa em cavacos e/ou na agregação deste material, formando unidades de alta densidade.

2.4.1.1. Cavaqueamento

O cavaqueamento pode ser definido como a redução do material em partículas menores, ou seja, a transformação da biomassa em cavacos. Além de solucionar os problemas de manuseio, estoque e transporte da biomassa, o cavaqueamento também prepara o material para a conversão energética, pela redução no tamanho das partículas e homogeneização da composição do material.

Os cavaqueadores podem ser providos de motor próprio ou podem estar acoplados a tratores e caminhões como fonte de potência. Os modelos maiores, apesar das limitações operacionais em função do peso e dimensões da base, possuem a vantagem de terem elevada capacidade de produção de cavacos, e, por isto, são mais indicados para áreas com disponibilidade de grande quantidade de biomassa. Por outro lado, os modelos menores acoplados a tratores têm como vantagem uma maior mobilidade e agilidade em condições de campo, adaptando-se melhor a condições adversas de terreno e solos com baixa capacidade de suporte (LEINONEN, 2004).

A alimentação dos cavaqueadores pode ser realizada manualmente ou por grua hidráulica e a descarga dos cavacos produzidos ocorre por impulsão pneumática através de uma calha ou por um sistema de correias. A produtividade do cavaqueamento é influenciada pelas características do cavaqueador e da matéria-prima, condições e tempo de estoque e local de trabalho (LEINONEN, 2004).

Há diversos tipos de cavaqueadores disponíveis comercialmente, podendo ser do tipo picador ou triturador. A escolha do tipo de cavaqueador vai depender das dimensões da madeira processada, da quantidade de cavacos requerida e da taxa de

produção desejada, bem como do tamanho e da uniformidade dos cavacos necessários (CHRISTOPHERSON et al., 1993).

2.4.1.1.1. Picadores

Os picadores possuem lâminas ou facas, geralmente acopladas em um disco ou em um tambor, que cortam a madeira com alta velocidade de rotação, produzindo cavacos de forma e tamanho uniformes e superfície lisa (POTTIE e GUIMIER, 1985).

Os picadores de disco são mais sensíveis a impurezas na biomassa cavaqueada e, por isso, são mais indicados para matéria-prima homogênea, como árvores desgalhadas. Os picadores de tambor não são tão sensíveis à heterogeneidade da matéria-prima, sendo adequados para processar resíduos florestais (ALAKANGAS et al., 1999).

O desempenho dos picadores é influenciado pelo ângulo e pela afiação das facas, pela velocidade de rotação e pela velocidade de alimentação. Outros fatores incluem o diâmetro e a umidade da madeira cavaqueada (CHRISTOPHERSON et al., 1993).

Alguns autores afirmam que a energia requerida pelos picadores será maior quanto mais seco for o material a ser cavaqueado (POTTIE e GUIMIER, 1985). Estima-se que o consumo de energia de um picador de disco no cavaqueamento de madeira seca é duas vezes maior do que no de madeira verde (HAKKILA, 1989).

Um estudo avaliou a produtividade de dois picadores *Morbark* em função de diferentes conteúdos de umidade de fustes cavaqueados. De acordo com os resultados, a produtividade do picador *Morbark* 27 (650 hp) não foi afetada pelo conteúdo de umidade. Porém, a produtividade do picador *Morbark* 20 (350 hp) diminuiu à medida que diminuiu o conteúdo de umidade. O autor explica que quanto mais secos forem os fustes cavaqueados, maior será a necessidade de trocas de facas do picador. Isso reduz o tempo produtivo e, conseqüentemente, aumenta o custo por hora produtiva e por tonelada de cavacos (WATSON et al., 1986).

Infere-se que as trocas e afiações de facas são as maiores causas de tempo parado dos picadores, que perdem a capacidade de corte, resultando em redução da produtividade e aumento de consumo de energia por unidade de material cavaqueado (POTTIE e GUIMIER, 1985).

2.4.1.1.2. Trituradores

Os trituradores possuem martelos, que quebram ou despedaçam a madeira com alta ou baixa velocidade de rotação, produzindo cavacos de forma e tamanho irregulares e superfície áspera. Os trituradores são bastante tolerantes a impurezas na biomassa, como areia, solo e pequenas pedras, e têm a vantagem de não necessitarem de afiação de facas (POTTIE e GUIMIER, 1985).

Alguns autores afirmam que, ao contrário dos picadores, a energia requerida pelos trituradores será menor quanto mais seco for o material a ser cavaqueado (POTTIE e GUIMIER, 1985).

2.4.1.1.3. Cavaqueamento em um sistema de toras curtas

No sistema de colheita florestal mecanizado de toras curtas (*cut-to-length*), as árvores são cortadas, desgalhadas e traçadas em toras de 3 a 6 metros dentro da floresta, por *Harvesters*, e as toras são extraídas para as margens das estradas ou pátios intermediários por *Forwarders*.

Com a adição de um cavaqueador para aproveitamento de resíduos, são incluídos nas fases de trabalho desse sistema, o baldeio, o estoque e o cavaqueamento dos resíduos. Desta forma, os sub-sistemas são diferenciados basicamente pela fase de cavaqueamento, que pode ser realizada dentro da floresta, às margens de estradas, em pátios intermediários ou na indústria (LEINONEN, 2004).

Para tornar mais fácil e eficiente a coleta dos resíduos, as técnicas de trabalho da etapa de corte são modificadas. Normalmente, o *Harvester* corta as árvores em um ou em ambos os lados da trilha e o processamento das toras é realizado em frente da máquina. Assim, no método tradicional, os resíduos permanecem na trilha e são pisoteados pelos pneus do *Harvester* e do *Forwarder*. Porém, no método de trabalho modificado, os resíduos são empilhados em um ou em ambos os lados da trilha, para facilitar o carregamento (LEINONEN, 2004).

A extração dos resíduos é realizada por *Forwarder* convencional, geralmente com algumas adaptações. Tendo em vista que os resíduos possuem menor densidade que a madeira em toras, a capacidade de carga do *Forwarder* pode ser aumentada, objetivando um aumento da produtividade e redução do custo da extração. Um

Forwarder convencional, com capacidade de 4-5 m³, pode ter a caçamba aumentada para 8-14 m³ (LEINONEN, 2004). Um *Forwarder* de tamanho médio pode ter a capacidade aumentada para 8-10 toneladas, resultando em uma redução de 10% nos custos da atividade (HAKKILA, 1989).

A garra convencional utilizada no carregamento das toras de madeira também não é adequada para o carregamento dos resíduos, sendo substituída por uma garra com “dedos”, comercialmente disponível. O carregamento com a garra adaptada é 30% mais rápido do que com a garra convencional (KALLIO e LEINONEN, 2005).

A empresa finlandesa *Vapo Oy Energy* introduziu na extração de resíduos uma caçamba equipada com lados compressores, os quais permitem a compressão e redução do volume dos resíduos, dobrando a capacidade de carga. Além disto, quando a caçamba está cheia, as laterais compressoras se fecham, mantendo os resíduos no seu interior e evitando perdas durante o percurso de extração. A caçamba possui capacidade de carga de 45 m³ de resíduos e é acoplada a um trator carregador. O equipamento é denominado *Havu-Hukka* (Figura 4). Estima-se que o transporte pode ser realizado até uma distância de 10 km (LEINONEN, 2004; KALLIO e LEINONEN, 2005).



Fonte: KALLIO e LEINONEN (2005).

Figura 4. Extração de resíduos com *Havu-Hukka*.

As empresas *Continental Biomass Industries* (CBI) e *Allan Bruks* introduziram comercialmente uma caçamba para a extração de resíduos. A caçamba foi desenvolvida para ser adaptada em *Forwarders* e possui lados ajustáveis compressores, com capacidade de carga de 10 toneladas (CBI, 2008; ALLAN BRUKS, 2008) (Figura 5).



Fonte: CBI (2008).

Figura 5. Carregamento (esquerda), transporte (centro) e descarregamento (direita) de resíduos florestais com a caçamba compressora adaptada em *Forwarder*.

a) Cavaqueamento nas margens de estradas

Neste sub-sistema, os resíduos florestais são extraídos para as margens das estradas, onde podem ser estocados para redução da umidade e, posteriormente, cavaqueados. Os tratores móveis cavaqueadores são mais indicados para o cavaqueamento nas margens das estradas pela sua agilidade, mobilidade e capacidade de trabalho em condições adversas. Geralmente, os resíduos cavaqueados são acondicionados diretamente em caminhões containers para o transporte até a planta energética (Figura 6) (LEINONEN, 2004). A integração entre o cavaqueador e o caminhão é considerado o ponto fraco deste sub-sistema (HAKKILA, 2004).



Fonte: KALLIO e LEINONEN (2005).

Figura 6. Sub-sistema com cavaqueamento nas margens de estradas.

A empresa finlandesa *Biowatti Oy* introduziu caminhões com capacidade de realizar o cavaqueamento dos resíduos e o transporte dos cavacos até a planta energética, unindo em uma mesma máquina duas fases do sistema (Figura 7). Cada

caminhão, denominado *Sisu Chipper*, possui picador de tambor e três containers com capacidade de carga de 100 m³ cada (Figura 8) (KALLIO e LEINONEN, 2005).



Fonte: KALLIO e LEINONEN (2005).

Figura 7. Sistema com cavaqueamento nas margens de estradas.

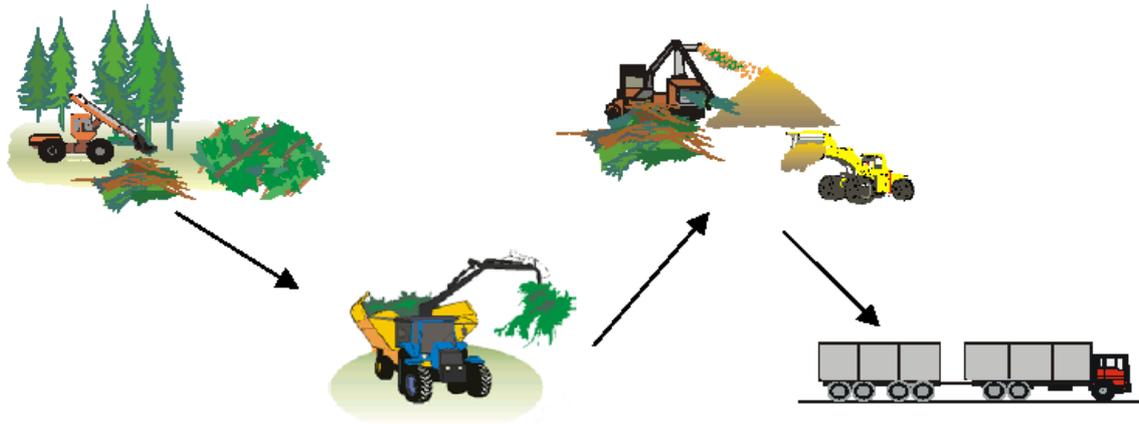


Fonte: KALLIO e LEINONEN (2005).

Figura 8. Caminhão com capacidade de realizar o cavaqueamento dos resíduos e o transporte dos cavacos até a planta energética (*Sisu Chipper*).

b) Cavaqueamento em pátios intermediários

Neste sub-sistema, os resíduos florestais são extraídos para pátios intermediários, onde podem ser estocados para redução da umidade e, posteriormente, cavaqueados. *Havu-Hukkas* estão sendo empregados na extração dos resíduos à longas distâncias. No cavaqueamento são empregados cavaqueadores que possuem maior capacidade produtiva. Os cavacos resultantes podem ser acondicionados diretamente em caminhões containers para o transporte ou depositados no chão, formando estoques de reserva (Figura 9) (LEINONEN, 2004).



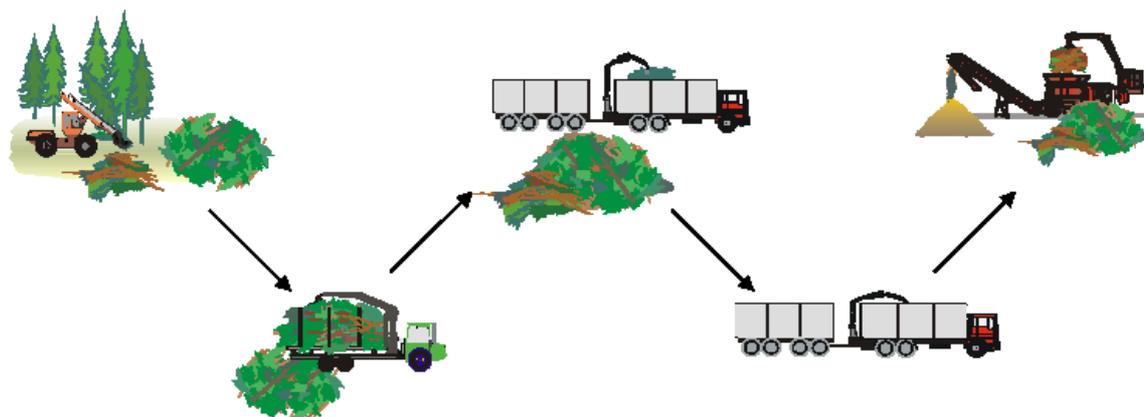
Fonte: RANTA et al. (2001).

Figura 9. Sub-sistema com cavaqueamento em pátios intermediários.

O cavaqueamento em pátios intermediários é recomendado em casos de abastecimento de grandes plantas energéticas, pela possibilidade de formação de grandes estoques. Quanto maior a disponibilidade de resíduos, maiores serão as vantagens deste sistema, entre elas o maior controle do processo (HAKKILA, 2004). Este sistema também tem como vantagem a possibilidade de melhor secagem dos resíduos, resultando em cavacos de melhor qualidade (LEINONEN, 2004).

c) Cavaqueamento na indústria

Neste sub-sistema, os resíduos são transportados até a planta energética em sua forma original. O cavaqueamento na indústria geralmente é realizado por trituradores estacionários (Figura 10). O principal desafio deste sub-sistema está relacionado com o custo por volume transportado, devido a baixa densidade dos resíduos. Por isso, estudos indicam que o cavaqueamento na indústria é economicamente viável para distâncias de transporte de até 55 km (LEINONEN, 2004; KALLIO e LEINONEN, 2005).



Fonte: RANTA et al. (2001).

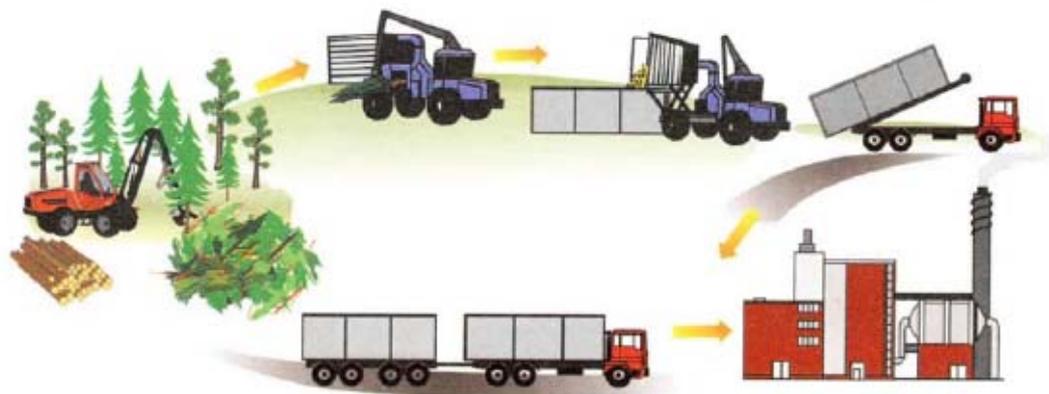
Figura 10. Sub-sistema com cavaqueamento na indústria.

Como resultado da baixa densidade dos resíduos, o tamanho da carga a ser transportada é determinado pelo volume e não pelo peso máximo permitido. Uma das alternativas que tem sido empregada para contornar esse problema é a compactação dos resíduos no caminhão, utilizando-se guas mais pesadas (LEINONEN, 2004).

Por outro lado, a economia de escala da estrutura fixa de cavaqueamento na indústria pode tornar o processo mais barato, em vista do uso de cavaqueadores móveis no campo. Acrescenta-se também que o sistema possui logística facilitada, uma vez que o carregamento e o transporte dos resíduos independe da etapa de cavaqueamento (RANTA e RINNE, 2006).

d) Cavaqueamento na floresta

O sub-sistema com cavaqueamento dentro da floresta tem sido o menos utilizado. É baseado em uma única máquina (*Terrain Chipper*) que realiza a coleta e a picagem dos resíduos dentro floresta, depositando-os diretamente em um reboque de carga. Depois de carregado, o *Terrain Chipper* despeja os cavacos diretamente em containers avulsos dispostos nas margens das estradas, que são transportados até a planta energética por caminhões (Figura 11). Há vários tamanhos de *Terrain Chipper* no mercado, e a produtividade de coleta e de cavaqueamento varia de 15 a 20 m³ de resíduos por hora, em uma distância média de extração de 200 m. Os containers possuem capacidade em torno de 20 m³ (ALAKANGAS et al., 1999).



Fonte: KALLIO e LEINONEN (2005).

Figura 11. Sub-sistema com cavaqueamento dentro da floresta.

A vantagem deste sub-sistema está na concentração das atividades em uma única máquina, que torna mais fácil a organização do trabalho. Além disso, o sub-sistema requer menor área nas margens das estradas para estoque de cavacos, uma vez que os mesmos ficam concentrados nos containers (LEINONEN, 2004). Por outro lado, o *Terrain Chipper* requer solos com boa capacidade de suporte (HAKKILA, 2004). O sub-sistema também tem como desvantagens a baixa habilidade de trabalho em terrenos adversos, a fraca competitividade econômica na extração de resíduos a longas distâncias e a baixa qualidade dos cavacos produzidos, em função do elevado teor de água devido à secagem ineficiente dentro da floresta (KALLIO e LEINONEN, 2005).

2.4.1.1.4. Cavaqueamento em um sistema de árvores inteiras

No sistema de colheita florestal mecanizado de árvores inteiras (*full-tree*⁵), as árvores são cortadas por *Feller-bunchers* e transportadas por *Skidders* até as margens das estradas ou pátios intermediários para processamento. Geralmente, o desgalhamento é realizado por *Delimbers* e o traçamento por *Slashers*.

Nesse sistema, o cavaqueador é incluído nas margens das estradas ou em pátios intermediários para o processamento dos resíduos (Figura 12). Os cavaqueadores do tipo trituradores são amplamente empregados por serem mais resistentes a impurezas adquiridas pela galhada das árvores durante a extração, tendo em vista que são

⁵ Nos Estados Unidos, o termo “whole-tree” é usado como sinônimo do termo “full-tree”. Este sistema não inclui a extração e o aproveitamento das raízes. Os sistemas com extração e aproveitamento de raízes raramente são empregados e são denominados como “complete-tree” (árvore completa).

arrastadas sobre o solo por *Skidders*. Os cavacos produzidos geralmente são lançados pelo cavaqueador diretamente em caminhões containers para o transporte final. Contudo, também podem ser despejados no chão, requerendo, neste caso, equipamento adicional para seu carregamento para os containers.



Fonte: LEINONEN (2004).

Figura 12. Sistema de árvores inteiras com cavaqueamento de biomassa residual.

2.4.1.1.5. Estoque de cavacos

As plantas energéticas geralmente operam ininterruptamente, requerendo um contínuo abastecimento de biomassa cavaqueada para a geração de energia. Por isso, os cavacos são estocados em grandes pilhas a céu aberto, onde permanecem por certo tempo até serem utilizados (LEINONEN, 2004).

O problema é que a biomassa florestal cavaqueada é susceptível a processos de degradação química, física e biológica, que promovem perda de massa seca e comprometem a qualidade do combustível (CHRISTOPHERSON et al., 1993).

Tanto processos auto-oxidativos como enzimáticos ocorrem durante a estocagem da madeira. A auto-oxidação e as reações enzimáticas são influenciadas pelas condições prevalentes durante a estocagem e estas reações são muito mais rápidas na madeira estocada na forma de partículas que na estocada na forma de toras (BRAND, 2007).

Além da perda de massa, que influencia diretamente o conteúdo de energia do combustível, as grandes pilhas de cavacos estocados têm o problema de que, sob certas condições climáticas, principalmente durante o verão, podem atingir altas temperaturas, a ponto de causar combustão espontânea (CHRISTOPHERSON et al., 1993).

A geração de calor durante os primeiros dias de estocagem ocorre principalmente quando os cavacos não estão propriamente secos, em função da respiração das células vivas ainda presentes na biomassa. O calor liberado inicialmente favorece o desenvolvimento de microorganismos, que também liberam calor pela respiração. Essas reações típicas resultam em um aumento na concentração de dióxido de carbono e calor na pilha de cavacos (HAKKILA, 1989).

Além da respiração de células vivas e microorganismos, várias reações químicas ocorrem no estoque de cavacos. Quando as células vivas morrem, liberam extrativos orgânicos que facilmente reagem com o oxigênio atmosférico em reações exotérmicas. Além disso, quando o ar não circula livremente através da pilha em função do tamanho e da compactação dos cavacos, bolsas de ácido acético produzido por fungos e bactérias são formadas. Em suficientes concentrações, o ácido acético oxida a madeira, criando temperaturas entre 80 e 100° C. Se os cavacos são expostos a essas temperaturas por 60-90 dias, combustões espontâneas podem ocorrer (CHRISTOPHERSON et al., 1993).

A temperatura de combustão espontânea varia conforme o tamanho da pilha, estação climática, conteúdo de umidade e concentrações de oxigênio. Por isso, o período ideal para o estoque de cavacos varia de acordo com as condições locais. Mas, quanto menor o tempo de estoque dos cavacos, menores serão os riscos de geração de calor na pilha. Baseado nisso, o autor citado acredita que o período ideal de estoque de cavacos é de duas a quatro semanas. O mesmo autor acrescenta ainda que as pilhas de cavacos não devem ultrapassar 15 metros de altura e que a compactação das pilhas deve ser evitada para facilitar a dissipação do calor (FULLER, 1985).

Uma alternativa que tem sido apresentada para os problemas de aquecimento e perda de massa seca, comuns na estocagem de cavacos, é a secagem dos resíduos no campo. Isso porque a biomassa seca tem maior potencial de preservação (JIRJIS, 1995).

A madeira seca, com conteúdo de umidade abaixo do ponto de saturação de fibras (20-24%), não apresenta células vivas e não é susceptível ao ataque de fungos e bactérias. Consequentemente, a pilha de estoque de cavacos secos não é susceptível a deterioração e perda de massa seca ou significativa geração de calor (SPRINGER, 1980).

Em contrapartida ao fato de que o cavaqueamento também acelera a secagem da biomassa florestal, estudos indicam que a secagem posterior ao cavaqueamento apresenta vantagens condicionais. Um estudo com árvores de pequeno diâmetro (menores que 12,7 cm) mostrou que se houver chuva após as primeiras três ou quatro semanas do cavaqueamento, a biomassa cavaqueada absorverá umidade mais

rapidamente do que a biomassa não cavaqueada. Somente com o aumento do tempo de secagem para cinco ou seis semanas é que as variações de umidade causadas por chuvas diminuirão (SIROIS et al., 1991).

2.4.1.2. Enfardamento

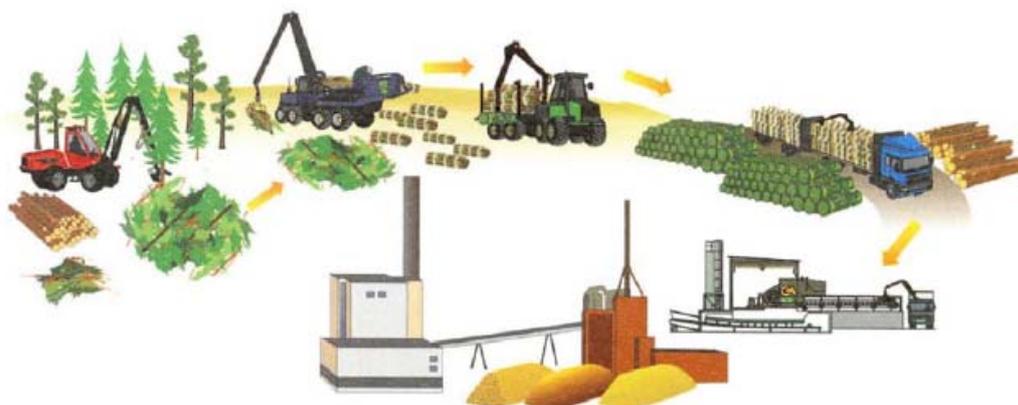
A tecnologia de enfardamento (*bundling*) vem sendo utilizada na Europa, principalmente na Finlândia, em conjunto com sistemas de toras curtas (*cut-to-length*), para aproveitamento dos resíduos florestais, tais como topo de árvores, galhos e árvores de pequenas dimensões. O enfardador (*bundling machine*), adaptado em um chassi de *Forwarder*, realiza a coleta e compactação da biomassa florestal residual, formando fardos cilíndricos amarrados com corda plástica (Figura 13) (LEINONEN, 2004).



Fonte: HAKKILA (2004).

Figura 13. Enfardador (*bundling machine*).

A grande vantagem deste sistema é que os fardos podem ser manipulados, transportados e estocados como toras de madeira. A extração é realizada por *Forwarder* e os fardos podem ser empilhados nas margens de estradas ou em pátios intermediários. O transporte é realizado por caminhões de madeira em toras e o cavaqueamento é realizado na indústria por trituradores (Figura 14) (LEINONEN, 2004). Além disso, o enfardamento constitui uma alternativa para os problemas de aquecimento e deterioração, comuns no estoque de cavacos úmidos em pilhas (CUCHET et al., 2004).



Fonte: KALLIO e LEINONEN (2005).

Figura 14. Sistema de enfardamento de resíduos florestais.

Quando comparado com os sistemas convencionais, o sistema de enfardamento apresenta vantagens logísticas, confiabilidade, alta disponibilidade operacional, maior controle do processo, produção em escala e impactos ambientais reduzidos. A máquina opera independentemente de outra, tornando o sistema integrado, otimizado e confiável; o sistema de aproveitamento de resíduos se integra de maneira simples ao sistema de colheita de madeira, pois a extração e o transporte podem ser realizados com os equipamentos convencionais; a máquina enfardadora gera informações sobre a produção diária em tempo real; o estoque dos fardos é facilitado, requerendo espaços reduzidos e resultando em poucas perdas e deterioração de biomassa, mesmo em longo prazo; e a máquina produz menos ruído, poeiras e descargas (HAKKILA, 2004).

O primeiro enfardador empregado na Finlândia (*Fiberpac 370*), manufaturado pela empresa sueca *Fiberpac AB*, era montado no espaço de carga do *Forwarder* da *Timberjack*, a qual acabou comprando, em 2002, a patente do enfardador. Além do *Fiberpac 370*, a *Timberjack* também introduziu no mercado o enfardador *Timberjack 1490D*, montado no *Forwarder Timberjack 1490D* (KÄRHÄ e VARTIAMÄKI, 2006).

Nas condições finlandesas, o enfardador *Timberjack FB370* produz fardos de 3 m de comprimento e entre 60 e 80 cm de diâmetro, amarrados com cordas plásticas a cada 40 cm. Cada fardo pesa cerca de 500 kg e o enfardador produz cerca de 20 fardos por hora (KALLIO e LEINONEN, 2005).

Uma avaliação do *Timberjack FB370* no enfardamento de resíduos de cortes rasos na França resultou em produtividades entre 11 e 24 fardos por hora efetiva, correspondendo entre 5 e 9 toneladas por hora. Os melhores resultados foram obtidos em florestas de *Populus* e *Pinus pinaster*. Os autores concluíram que os principais fatores

que afetam a produtividade do enfardador são a quantidade de resíduos disponíveis por unidade de área, o tamanho dos resíduos e o layout dos resíduos no campo. Melhores resultados foram obtidos no enfardamento de grandes quantidades de resíduos, de tamanho grande e concentrados em pilhas (CUCHET et al., 2004).

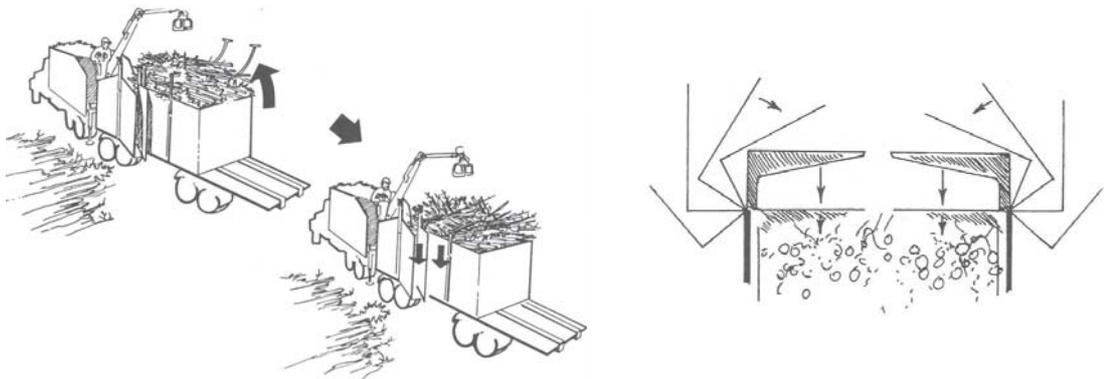
Em 2003, a *Timberjack* introduziu o primeiro enfardador nos Estados Unidos. O desempenho operacional do *Timberjack* 1490D foi avaliado em sete áreas na região oeste dos Estados Unidos, resultando numa média de 15 fardos por hora produtiva. Os fardos produzidos apresentaram comprimentos médios entre 2,5 e 4,9 metros e pesos médios entre 235 e 805 kg, variando conforme a área (RUMMER et al., 2004).

Além da *Timberjack*, outras duas empresas também introduziram enfardadores no mercado. A empresa *Wood Pac AB* introduziu, no final da década de 1990, o enfardador *Wood Pac*, cuja patente foi vendida para a *Partek Forest*. Em 2002 a *Partek* lançou o enfardador *Valmet Wood Pac*, e em 2004 a *Komatsu Forest* lançou o novo *Valmet Wood Pac*, montado no espaço de carga do *Forwarder Valmet* 860.1. Em 2003, a empresa finlandesa *S. Pinomäki Ky* (atualmente *Pinox Oy*) também introduziu um enfardador, *Pika RS 2000*, montado no espaço de carga do *Harvester-Forwarder Pika* 828 *Combi* (KÄRHÄ e VARTIAMÄKI, 2006).

2.4.1.3. Compactação de biomassa florestal em veículos de transporte

A biomassa florestal pode ser compactada nos veículos de transporte utilizando-se guas mais pesadas para o carregamento. Isso possibilita a redução de até 20% do volume de resíduos da colheita (LEINONEN, 2004). Um estudo mostrou que a compactação dos resíduos florestais com guas mais pesadas possibilita aumento na capacidade de transporte entre 12 e 35% e redução de custos de até 35% (LARSSON e CARLSSON, 1982).

Outras possibilidades incluem dispositivos hidráulicos acoplados nas caçambas de transporte, que compactam os resíduos, aumentando sua densidade (Figura 15) (POTTIE e GUIMIER, 1985).



Fonte: POTTIE e GUIMIER (1985).

Figura 15. Compactação em veículos de transporte.

2.4.2. Desbastes

Os desbastes são realizados, basicamente, para remover parte das árvores da floresta, objetivando estimular o crescimento das árvores remanescentes, uma vez que, ao se reduzir o número de árvores por unidade de área, promove-se a redução da competição entre as árvores por luz, umidade e nutrientes do solo.

Existem vários regimes de desbaste, variando quanto ao método ou forma de escolha das árvores a serem removidas, podendo ser seletivos ou sistemáticos; quanto à intensidade ou grau de remoção; e quanto ao início e a frequência, ou seja, a idade do primeiro desbaste e o tempo médio entre eles.

Geralmente, os desbastes são realizados para remover as árvores de baixa qualidade e/ou pequenas dimensões, objetivando abrir espaço para o incremento das árvores de melhor qualidade. Mas, os desbastes também são práticas realizadas para evitar acúmulo de biomassa combustível, que coloca a floresta em situação de risco de incêndios, e para eliminação de focos de pragas e doenças.

O desbaste mecanizado nem sempre é viável economicamente, uma vez que as máquinas convencionais são grandes e as árvores desbastadas geralmente são pequenas, com pouco valor comercial. Estima-se que o corte mecanizado é economicamente viável para árvores com volume acima de $0,015 \text{ m}^3$ (HAKKILA, 2004).

Diversas empresas têm desenvolvido cabeçotes de corte para desbastes em florestas jovens. A Timberjack, por exemplo, desenvolveu um *Harvester* para árvores de pequena dimensão, com um cabeçote multifuncional capaz de cortar e acumular até

10 árvores para empilhá-las em feixes. Isso reduz a movimentação da grua e aumenta a produtividade da máquina (LEINONEN, 2004; KALLIO e LEINONEN, 2005).

Apesar disto, quanto menor forem as dimensões das árvores, geralmente mais lucrativo é o corte com motosserras. Nos países escandinavos, exemplo a Finlândia, o desbaste de florestas jovens, com disponibilidade de madeira somente para aproveitamento energético, ainda tem sido realizado manualmente, com motosserras equipadas com armação de corte, a qual possibilita ao operador cortar as árvores em posição ereta (Figura 16). A produtividade varia entre 1,5 e 4,0 m³ por hora, dependendo da espécie, das dimensões da árvore, das condições do sub-bosque e do terreno (LEINONEN, 2004; KALLIO e LEINONEN, 2005). Porém, esta motosserra é indicada apenas para desbastes de árvores com até 12 cm de DAP (HAKKILA, 1989).

As árvores cortadas podem ser empilhadas ao lado das trilhas, formando feixes, que são extraídos por *Forwarders* até as margens das estradas. Nestas circunstâncias, o método de cavaqueamento mais usual é o realizado nas margens das estradas, com transporte realizado por caminhões containers (LEINONEN, 2004).



Fonte: BJÖRHEDEN et al. (2003) e RÖSER & SIKANEN (2007).

Figura 16. Motosserra equipada com armação de corte, usada em desbastes.

2.4.3. Tocos e raízes

Registros sobre a extração de tocos e raízes de árvores para limpeza de área datam do começo da década de 1900. Na Finlândia, tocos e raízes eram extraídos manualmente e usados como combustível. Porém, o aumento do custo da mão-de-obra inviabilizou a atividade manual. Na década de 1960, iniciaram-se as discussões sobre a remoção mecanizada de tocos e raízes (HAKKILA, 1972; SPINELLI et al., 2005).

Na década de 1970, o *boom* Escandinavo da manufatura de celulose justificou o esforço para a procura de novas fontes de matéria-prima florestal, sendo que, inicialmente, o objetivo era aumentar o rendimento de fibras para celulose. Naquela época, pesquisadores finlandeses abriram o caminho para a mecanização da extração de tocos e raízes e hoje estão liderando a retomada desta atividade devido ao renovado interesse do aproveitamento da biomassa para energia (SPINELLI et al., 2005).

Segundo Hakkila (1972), inicialmente eram empregados tratores com lâminas na remoção mecanizada de tocos e raízes. O autor descreve diversos protótipos utilizados, incluindo tratores, escavadeiras e a *Pallari Stump Harvester*, que é uma escavadeira específica para a remoção de tocos e raízes. A *Pallari* possui um dispositivo que combina extração e partição da biomassa e que consiste em uma lâmina de cisalhamento e dois dentes de extração fixados sobre uma bigorna. Desenvolvida entre 1971 e 1972 com financiamento de indústrias finlandesas, a *Pallari* teve grande projeção na Europa, sendo testada com sucesso na Dinamarca, França e Suécia.

A extração de tocos e raízes após a colheita da madeira requer o emprego de máquinas com grande força de extração. Tocos com diâmetro entre 20 e 35 cm requerem em torno de 70.000 e 80.000 kg de força. Por isso, há uma grande vantagem em extrair o sistema toco-raízes juntamente com o tronco da árvore, pela redução da força de extração (HAKKILA, 1972).

Nos Estados Unidos, Koch e Coughran (1975) apresentaram o histórico do desenvolvimento de um protótipo para extração de árvores completas em plantios de *Pinus sp.* O protótipo consistia em um cabeçote *Rome TX 1600* acoplado a um *Skidder*. O cabeçote cortava as raízes laterais com um tipo de tesoura e então puxava a árvore completa com a massa de raízes centrais. Conforme descrito pelos autores, o protótipo apresentou bom desempenho na extração de árvores com diâmetro de até 33 cm. Ainda segundo os autores, foi possível aumentar a quantidade disponível de fibras em plantios de *Pinus sp.* em aproximadamente 20%. Além disso, houve substancial redução dos custos de preparo de solo subsequente. Por outro lado, as impurezas contidas no sistema radicular foram reconhecidas como um grande obstáculo do sistema.

Mais tarde, o extrator de árvores completas *Rome TXH*, desenvolvido para plantações de *Pinus sp.* para celulose, foi avaliado com folhosas no sudeste dos Estados Unidos, devido à sua disponibilidade comercial. O autor do estudo concluiu que a máquina era tecnicamente viável para a extração de folhosas com DAP de até 23 cm. Em relação à viabilidade econômica, o autor acrescentou que dependeria de futuras

demandas por biomassa (SIROIS, 1977). Contudo, segundo Hakkila (1972), árvores com elevados diâmetros tendem a inviabilizar a atividade.

Por isso, na Finlândia, tocos e raízes principais têm sido removidos após o corte raso por máquinas potentes, compostas por escavadeira e cabeçote apropriado (Figura 17). Há diversos cabeçotes disponíveis comercialmente, muitas vezes capazes de dividir o toco em partes menores. De modo geral, para remover o toco, o dente principal do cabeçote é posicionado abaixo do toco e, como uma alavanca, tenta levantá-lo. Após a remoção, o toco é comprimido entre o dente principal e a faca de partição. Quando o toco for muito grande, ele é dividido em duas ou quatro partes. No caso do toco ser muito grande para ser extraído de uma única vez, as raízes laterais podem ser cortadas. Usualmente são removíveis tocos com diâmetro de até 60 cm (ANDIS et al., 2009).



Fonte: NORTHERN WOOD HEAT (2007).

Figura 17. Escavadeira e cabeçote para remoção de toco e raízes.

Após a remoção do sistema toco-raízes, o baldeio geralmente é realizado por *Forwarder* convencional e o transporte até a planta energética por caminhões containers. O cavaqueamento tem sido realizado na indústria por trituradores, devido a impurezas na biomassa (Figura 18) (KALLIO e LEINONEN, 2005).

Entretanto, segundo Hakkila (1972), o transporte da biomassa a granel é um fator limitante para a viabilidade econômica do aproveitamento de tocos e raízes. Ainda segundo o autor, colheita de tocos e raízes é economicamente viável quando realizada juntamente com outros resíduos da colheita de madeira.



Fonte: HAKKILA (2004).

Figura 18. Sistema de remoção de tocos e raízes para aproveitamento energético.

A utilização de tocos e raízes para fins energéticos tem rapidamente emergido da fase de testes para a prática, como resultado de experiências positivas e pioneiras em co-geração (HAKKILA, 2004). Em 2005, na Finlândia, o consumo de cavacos provenientes de tocos pelas plantas energéticas com co-geração era estimado em 0,4 milhão de metros cúbicos (sólidos), triplo do consumo de 2004, o qual corresponde a 14% do consumo total de cavacos de origem florestal no país (Ylitalo, 2006 citado por LAITILA et al., 2008).

O aproveitamento energético do sistema toco-raízes pode ser atrativo, uma vez que representa entre 23 e 25% da massa total do tronco (KALLIO e LEINONEN, 2005). Além disso, as raízes geralmente possuem alto poder calorífico, muitas vezes maior do que a madeira do fuste (NURMI, 1977).

Outro aspecto positivo é que os tocos possuem propriedades que favorecem o estoque, pois não se decompõem e nem adquirem umidade em longos períodos. Geralmente a umidade de tocos permanece abaixo de 40%, ao mesmo tempo em que outros resíduos apresentam umidade em torno de 45-55% nas mesmas condições. Por isso, em algumas plantas energéticas, tocos e raízes são utilizados para diminuir o conteúdo de umidade médio de toda a mistura de biomassa (ALAKANGAS, 2005).

Além da possibilidade de aproveitamento energético, a remoção de tocos e raízes tem sido empregada em determinadas áreas como prática sanitária, visando eliminar fungos presentes em raízes e evitar que se proliferem na futura floresta. Alguns autores também destacam que a remoção de tocos facilita as operações silviculturais subsequentes, como preparo do solo e replantio. Com isso, há uma consequente redução

de custos de produção. Além disso, constatou-se um aumento da regeneração natural em áreas onde tocos foram removidos (HAKKILA, 2004; STUPAK et al., 2008).

Contudo, a remoção de tocos e raízes apresenta riscos para a sustentabilidade do solo e qualidade da água, que devem ser considerados: ocorrem distúrbios no solo que favorecem a erosão e conseqüente sedimentação em cursos d'água; o tráfego de máquinas contribui para a compactação do solo; há remoção do estoque de carbono e de nutrientes essenciais ao solo (FOREST RESEARCH, 2009).

Os principais fatores que afetam o risco de danos no solo são o tipo de solo e a declividade. A remoção de tocos e raízes deve ser evitada em solos pobres e susceptíveis à infertilidade. Áreas com declividade menor do que 20° são consideradas vulneráveis à erosão. Além disso, solos com menor conteúdo de água oferecem maior capacidade de suporte (FOREST RESEARCH, 2009).

Na Finlândia, a colheita de tocos tem ocorrido principalmente em pequenas áreas limitadas a *Picea abies* (que apresenta sistema radicular superficial). Ainda há a recomendação de que sejam deixados no campo, dependendo do tipo de solo, entre 20 e 30 tocos com diâmetro maior do que 15 cm por hectare, distribuídos sistematicamente. A remoção de tocos com diâmetro menor do que 15 cm é evitada por questões ambientais e econômicas. Outra medida para minimizar a exportação de material orgânico do solo é a preservação das raízes secundárias (STUPAK et al., 2008). Mesmo assim, é importante acrescentar que a Finlândia apresenta características particulares em termos de clima e de solo, que são, em grande parte, pantanosos.

Outra desvantagem do aproveitamento de tocos e raízes se deve à presença de impurezas, como solo, areia e pedras, que causam desgaste no cavaqueador e resultam no aumento dos custos. Por isso, no cavaqueamento de árvores completas, é mais adequado o emprego de trituradores, que são mais resistentes do que os picadores com facas. Além disso, a presença de impurezas na biomassa pode causar problemas durante a combustão, resultando em grande quantidade de cinzas. Por essa razão, recomenda-se que haja uma pré-secagem da biomassa no campo. Além de favorecer a redução do conteúdo de umidade, a permanência dos resíduos no campo após a extração possibilita que as impurezas sejam lavadas pela chuva (STUPAK et al., 2008). Mesmo assim, de acordo com Hakkila (1972), sempre haverá impurezas na biomassa do sistema toco-raízes. Na Finlândia, cavacos de tocos e raízes apresentam teores de cinzas variando de 2 a 20%, podendo conter até mais do que isso (ALAKANGAS, 2005).

2.4.4. Estoque e secagem de resíduos florestais

O estoque dos resíduos florestais para redução da umidade nem sempre é realizado, mas é considerada uma fase importante da colheita. O uso da biomassa na forma recém colhida não é indicado, pois mesmo nas melhores condições de colheita, as propriedades da biomassa conferirão baixo desempenho energético (BRAND, 2007).

A umidade, além de aumentar o custo de transporte da biomassa, afeta negativamente o processo de combustão e conversão energética e contribui para a oxidação química e o desenvolvimento de fungos. Quanto menor o tamanho das partículas, mais facilmente a biomassa se deteriora (POTTIE e GUIMIER, 1985).

Quando realizado, o local e o tempo de estoque dos resíduos são considerados no planejamento da colheita, podendo permanecer amontoados na floresta, estocados em pilhas às margens de estradas ou em pátios intermediários apropriados. Estudos comprovaram que a umidade diminui consideravelmente com o estoque, passando de 50 a 60% para menos de 30% (base úmida) (KALLIO e LEINONEN, 2005).

O conteúdo de umidade de resíduos florestais decresce rapidamente quando estes são deixados no campo em pequenas pilhas. O topo das pilhas pode ser coberto com papéis impermeáveis para evitar que re-adquiram umidade em função de chuvas. Estudos estimaram que cavacos de resíduos cobertos são 10% mais secos do que de resíduos não cobertos (JIRJIS, 1995; KALLIO e LEINONEN, 2005).

Um estudo concluiu que deixar na floresta os resíduos de corte raso é a melhor opção para secagem. Isso conferirá menor umidade e melhores condições de estoque ao material. O autor também acrescenta que ao deixar os resíduos na floresta, parte das folhas e acículas é perdida durante a secagem, o que é um aspecto positivo na ciclagem de nutrientes (NURMI, 1999).

Além disso, deve-se considerar que a folhagem contém grandes quantidades de células vivas e é rica em nitrogênio, que favorecem o desenvolvimento de fungos e aceleram a deterioração da biomassa e aumentam o risco de ignição espontânea dos cavacos estocados em pilhas (HAKKILA, 1989).

O estoque e a secagem de resíduos no campo têm sido apresentados como alternativa para os problemas de aquecimento das pilhas, decomposição da biomassa e perda de massa seca, comuns na estocagem de cavacos úmidos. Isso porque a biomassa seca tem maior potencial de preservação (JIRJIS, 1995).

2.5. Florestas energéticas

O termo floresta energética é usado para definir os plantios florestais com espécies de rápido crescimento, visando a produção de maior quantidade de biomassa por unidade de área em um menor intervalo de tempo. As diferenças básicas entre as florestas energéticas e as florestas tradicionais estão no menor ciclo de corte e no menor espaçamento entre as árvores, geralmente menor que 2 x 2 m, ou seja, mais de 2.500 árvores por hectare. Além da alta densidade, as florestas energéticas são caracterizadas por árvores de pequeno diâmetro (COUTO e MÜLLER, 2008).

No Brasil, as espécies mais adotadas para florestas energéticas são do gênero *Eucalyptus*. Também são encontradas, em função de características climáticas, espécies dos gêneros *Pinus*, *Acacia*, *Mimosa* e *Leucena*, que possuem rápido crescimento (VIANNA et al., 2000). Nos Estados Unidos e em alguns países da Europa, florestas de curta rotação vêm sendo plantadas para produção exclusiva de biomassa energética, principalmente com espécies dos gêneros *Eucalyptus*, *Salix*, *Populus* e *Platanus*.

A produção anual de um hectare de eucalipto, com crescimento médio de 35 m³/ha.ano, em termos de massa seca absoluta é de 10 toneladas, gerando 4.500 kcal/kg ou 40% do calor produzido por petróleo. Por conseguinte, de um hectare de eucalipto obtém-se, anualmente, combustível de biomassa equivalente a quatro toneladas de petróleo (MORITA, 2007).

Segundo o Ministério de Minas e Energia, o Brasil pode ser um dos beneficiários da oportunidade de aproveitamento de madeira para fins energéticos, devido à suas vantagens comparativas de extensão e disponibilidade de área, clima adequado, disponibilidade de mão-de-obra e grupos empresariais capazes de realizar os investimentos necessários (BRASIL, 2005).

Estima-se que o Brasil possua cerca de 140 milhões de ha de área disponível, dos quais boa parte não é apropriada para agricultura de alimentos (BRASIL, 2005). Aproximadamente 90 milhões de ha são áreas agricultáveis não utilizadas, que representam 10,5% do território brasileiro. Também se estima que cerca de 60 milhões de ha são áreas de pastagens que podem ser convertidas em curto prazo (SBS, 2006).

Destaca-se que enquanto o preço médio de um hectare de terra agricultável nos Estados Unidos é US\$ 6.670 (NASS, 2007), no Estado de São Paulo um hectare de terra para reflorestamento custa, em média, cerca de R\$ 6.540 (IEA, 2008), refletindo em um menor custo de produção. Os custos de florestas energéticas em São Paulo são de US\$

1,16/GJ (considerando a produtividade de 44,8 m³/ha.ano e distância média de transporte de 21,4 km) (BRASIL, 2005).

De fato, já em 1993 um estudo detalhado da Companhia Hidroelétrica São Francisco (CHESF) indicava potenciais para a produção de *Eucalyptus* em 50 milhões de ha inadequados a agricultura em três estados do Nordeste (12,6 EJ/ano; com uma conversão termo-elétrica de 20%, cerca de 85 GW), a custo médio de US\$ 1,36/GJ (CARPIENTIERI et al., 1993). Estes custos são extremamente atraentes, considerando que o objetivo de alguns programas nos Estados Unidos é atingir, nos próximos 20 anos, um custo entre 1,50 e 2,00 US\$/GJ (MACEDO, 2001).

A biotecnologia também possui papel relevante nas questões de adaptações dos cultivos das florestas energéticas às adversidades, possibilitando aumento de produtividade (BRASIL, 2005). Com os avanços tecnológicos alcançados no campo da silvicultura, tanto em termos de manejo e condução da floresta quanto do desenvolvimento de material genético, altos índices de produtividade são observados (COUTO e MÜLLER, 2008). Grande parte das florestas plantadas no Brasil é originária de plantios clonais de alta produtividade (no caso de *Eucalyptus*) ou de sementes melhoradas (no caso de *Pinus*), com adaptação e tolerância a fatores adversos de clima, solo e água (ABRAF, 2007).

Alguns autores também acreditam no potencial de geração de energia a partir da biomassa florestal produzida em florestas energéticas, como uma base para o desenvolvimento rural e geração de empregos em países em desenvolvimento (GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003).

A população brasileira era de 60 milhões de habitantes em 1960, dos quais 36 milhões residiam na zona rural e 24 milhões em áreas urbanas. Atualmente, a população é de 190 milhões, sendo que a população rural permanece nos 36 milhões, enquanto a urbana teve um crescimento superior a cinco vezes, chegando a 134 milhões. O afluxo aos centros urbanos dos trabalhadores braçais do campo foi compensado na lavoura pela mecanização, fruto da cultura do petróleo. A causa maior é a perda de postos de trabalho no campo. Não é possível depositar esperanças na lavoura para o retorno dos trabalhadores ao campo. Entretanto, o reflorestamento exige um trabalhador direto para cada 20 ha de área reflorestada. Para um milhão de quilômetros quadrados de área reflorestada, exige-se o emprego de cinco milhões de trabalhadores, o que possibilita o retorno de mais de 20 milhões de pessoas à área rural (MORITA, 2007).

Portanto, apesar das plantações energéticas aparecerem sempre como opção final, depois de esgotados os resíduos, deve-se considerar o alto potencial de florestas energéticas para determinadas áreas. Não há dúvidas sobre as dimensões e as vantagens competitivas, tais como conhecimento da indústria florestal e capacidade de produção a custos imbatíveis no mundo (MACEDO, 2001). Além disto, a vantagem adicional dos reflorestamentos está na possibilidade de fixação de carbono.

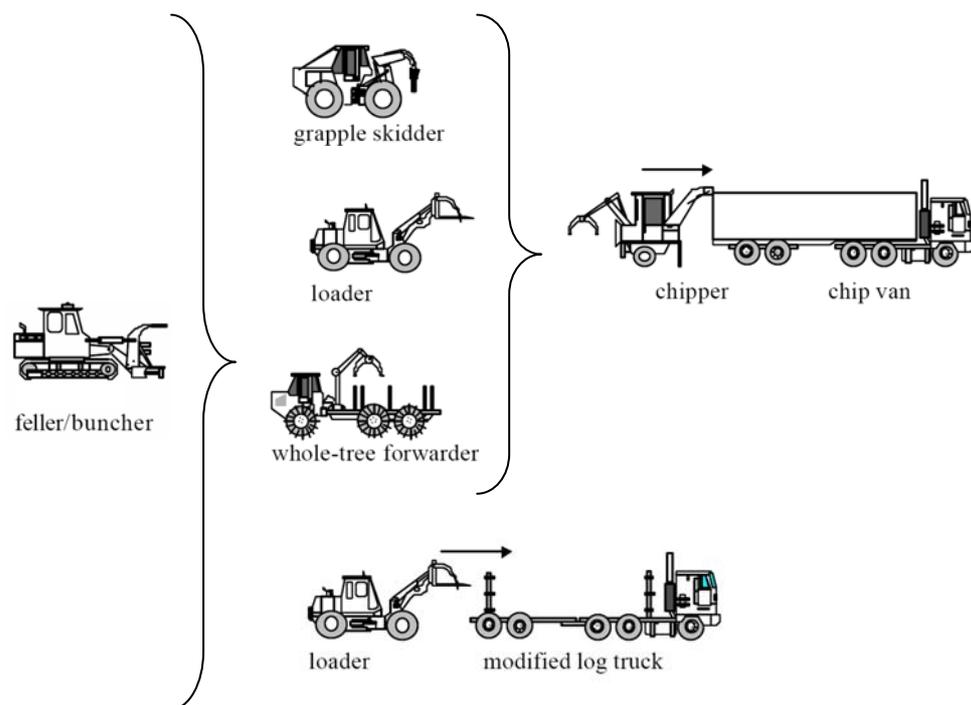
Acredita-se que qualquer cenário analisando o uso de energia de biomassa em maior escala nas próximas décadas, a nível mundial, concluirá por um grande potencial de uso de florestas plantadas. Embora evidentemente o potencial em curto prazo de aproveitamento dos resíduos seja atraente e deva ser realizado, é importante desenvolver tecnologias para viabilizar o potencial de florestas plantadas (MACEDO, 2001).

Muitas dificuldades limitam o desenvolvimento de máquinas e equipamentos especializados para a colheita de florestas plantadas com espécies de curta rotação. Primeiramente, porque não há uma única espécie padrão para plantio. Segundo, porque práticas silviculturais, rotação e espaçamento variam conforme a espécie e o local de plantio. Consequentemente, o mercado para cada máquina desenvolvida é limitado (CULSHAW e STOKES, 1995).

2.5.1. Sistema de colheita de árvores inteiras

O sistema de colheita florestal mecanizado de árvores inteiras (*full-tree*), composto por *Feller-buncher* e *Skidder*, com a adição de um cavaqueador, tem sido utilizado na colheita florestas plantadas de curta rotação. Porém, em florestas energéticas, o reduzido espaçamento entre as árvores, o pequeno diâmetro das árvores e o alto custo das máquinas e dos equipamentos convencionais constituem desvantagens para este sistema (HARTSOUGH e YOMOGIDA, 1996).

Como alternativa em florestas energéticas com árvores de pequeno diâmetro (menor do que 8 cm), *Skidders* estão sendo substituídos pela extração com carregadoras frontais ou *Forwarders*. Isso porque os *Skidders*, ao arrastarem as árvores, promovem a contaminação das galhadas com partículas de solo e areia, que não é desejável na conversão energética da biomassa (Figura 19) (HARTSOUGH e YOMOGIDA, 1996).



Fonte: Adaptado de HARTSOUGH e YOMOGIDA (1996).

Figura 19. Adaptações no sistema de árvores inteiras para a colheita de florestas plantadas de curta rotação para energia.

Um estudo comparou a extração de árvores inteiras de *Eucalyptus* com *Grapple Skidder Caterpillar 528* e carregadora frontal *Caterpillar 950F*, concluindo que a carregadora é entre 40 e 60% mais produtiva que o *Skidder*. Neste estudo, a produtividade média da carregadora foi de 67,5 toneladas por hora efetiva e a do *Skidder* foi de 39,8 toneladas por hora efetiva, com distâncias de extração entre 200 e 250 metros. Apesar da velocidade da carregadora ser entre 30 e 40% menor do que a do *Skidder*, esta máquina possui maior capacidade de carga (SPINELLI e HARTSOUGH, 2001). Porém, considera-se que as carregadoras frontais não são viáveis para árvores com mais de 18 m de comprimento (Figura 20) (HARTSOUGH e YOMOGIDA, 1996).

O tamanho das árvores também influencia a produtividade do *Feller-buncher*, que é significativamente maior em povoamentos com árvores de maiores diâmetros. Um estudo mostrou que o diâmetro mínimo econômico para sistemas convencionais com *Feller-buncher* e *Skidder* é de 15 cm (STOKES et al., 1986).



Fonte: SPINELLI e HARTSOUGH (2001).
Figura 20. Carregadora frontal.

2.5.2. Colhedoras agrícolas adaptadas

Algumas colhedoras agrícolas, principalmente de milho e cana-de-açúcar, têm sido adaptadas e aperfeiçoadas com sucesso para a colheita de espécies arbóreas com diâmetro de até 8 cm. Estas colhedoras realizam um processo de corte contínuo, mais rápido do que o tradicional processo de corte do *Feller-buncher*, e podem realizar apenas o corte (*cut-only harvester*) ou o corte e o cavaqueamento (*cut-and-chip harvester*) das árvores (HARTSOUGH e YOMOGIDA, 1996).

a) *Cut-and-chip harvester*

Estas colhedoras geralmente cortam duas fileiras de árvores simultaneamente por meio de serras circulares ou discos de corte. Geralmente duas hastes helicoidais puxam os fustes das árvores de encontro ao disco de corte. Os fustes cortados são direcionados até o picador por um sistema de cilindros transportadores. O picador acoplado à colhedora geralmente é do tipo tambor e a biomassa cavaqueada é propelida para um *Forwarder* coletor que se desloca ao lado da colhedora (Figura 21). Dentre as colhedoras de corte contínuo do tipo *cut-and-chip*, destacam-se: *Austoft Sugar Cane Harvester*, *Claas Jaguar Harvester*, *John Deere Harvester* e *Salix Maskiner Harvester* (HARTSOUGH e YOMOGIDA, 1996).



Fonte: FOREST RESEARCH (1998).

Figura 21. Colhedoras de corte contínuo do tipo *cut-and-chip*.

b) *Cut-only harvester*

Estas colhedoras são baseadas no mesmo método de corte das colhedoras *cut-and-chip*, com a diferença de que não realizam o cavaqueamento da biomassa. As árvores cortadas são acumuladas em uma plataforma de reboque traseira e quando a plataforma está cheia, os feixes são empurrados para fora da máquina para serem extraídos. Destacam-se as colhedoras *Frobbesta Coppice Harvester* e *Empire 2000* (HARTSOUGH e YOMOGIDA, 1996). A Figura 22 mostra a *Frobbesta Coppice Harvester* colhendo *Populus sp* com dois anos de idade para fins energéticos.



Fonte: FOREST RESEARCH (1998).

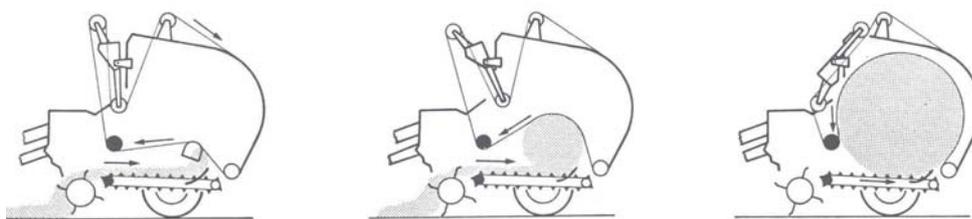
Figura 22. Colhedora de corte contínuo do tipo *cut-only* (*Frobbesta Coppice Harvester*).

2.5.3. Enfardadoras

O enfardamento (*baling*) tem sido amplamente utilizado na agricultura desde a década de 1970 e permite o aumento da densidade do material, uma vez que compacta a biomassa em fardos cilíndricos (*bales*). Isso facilita o manuseio, o estoque e o transporte

da biomassa. No caso de enfardamento de biomassa florestal, a vantagem adicional consiste na possibilidade do emprego de caminhões convencionais, usados no transporte de madeira em toras, para o transporte dos fardos.

A máquina enfardadora possui um tambor giratório que coleta o material e o envia, por um sistema de rolos compressores, para uma câmara arredondada. Essa câmara possui um sistema de cintos giratórios compressores que formam os fardos cilíndricos. Quando os fardos atingem o tamanho máximo determinado, são amarrados com uma malha plástica e ejetados no chão (Figura 23) (POTTIE e GUIMIER, 1985).



Fonte: POTTIE e GUIMIER (1985).

Figura 23. Processo de enfardamento (*baling*).

O enfardamento de biomassa florestal foi inicialmente analisado em termos de resultado do produto e conceito do equipamento. Porém, neste estudo, a enfardadora foi alimentada manualmente, não sendo, portanto, analisado o processo de coleta do material. Os autores concluíram que o enfardamento era uma alternativa tecnicamente viável para biomassa florestal picada (FRIDLEY e BURKHARDT, 1984).

Três enfardadoras comerciais *New Holland* foram testadas com cavacos gerados pela colhedora de forragem *John Deere* adaptada em vegetação de *Prosopis glandulosa*, com 4 m de altura e entre 5 e 15 cm de diâmetro. O processo de enfardamento mostrou-se satisfatório. Porém, nesta avaliação, as enfardadoras foram diretamente alimentadas com a biomassa, não sendo testado o desempenho de coleta de biomassa no campo (FELKER et. al, 1999).

O potencial do uso de enfardadoras agrícolas na produção de fardos de biomassa florestal também foi observado por Stokes et al. (1987) em vegetação lenhosa de pequeno diâmetro (DAP entre 2,5 e 7,5 cm). Neste estudo, a enfardadora agrícola *Claas Rollant 62* mostrou certo potencial na coleta e enfardamento de material lenhoso com até 5 cm de diâmetro previamente picado e seco no campo.

Um protótipo canadense de uma colhedora-picadora-enfardadora, desenvolvido a partir de uma enfardadora comercial *New Holland*, foi avaliado em cinco diferentes plantios de *Salix sp*, onde mostrou-se viável tecnicamente. A avaliação resultou em produtividades entre 0,14 e 0,32 hectare por hora efetiva (sem considerar o tempo de amarração dos fardos) (Figura 24) (SAVOIE et al., 2006; LAVOIE et al., 2007).



Fonte: LAVOIE et al. (2007).

Figura 24. Enfardadora (*baling machine*) desenvolvida para colher e embalar *Salix sp*.

2.6. Arbustos e árvores de baixo diâmetro

Na década de 1980 foi desenvolvida e testada uma máquina colhedora-picadora (*Nicholson-Koch Chip-Harvester*) para árvores de baixo diâmetro. Com largura de trabalho de 2,8 m, a *Nicholson-Koch Chip-Harvester* era capaz de cortar continuamente árvores de até 30,5 cm de diâmetro, cavaquear as árvores e lançar os cavacos diretamente em um *Forwarder* (SIROIS, 1981a; SIROIS, 1981b; SIROIS, 1982). Entretanto, a *Nicholson-Koch Chip-Harvester* nunca chegou a ser fabricada comercialmente. Acredita-se que, apesar do crescente potencial de aproveitamento energético de árvores de baixo diâmetro, o alto custo de colheita associado ao baixo preço dos cavacos de madeira para energia na época foram fatores que desmotivaram a continuidade do projeto.

Mais tarde, uma colhedora de forragem *John Deere* adaptada foi avaliada na colheita de arbustos e árvores de pequeno diâmetro para energia. A colhedora cortava a biomassa, num processo de corte-contínuo, enviando-a para o cabeçote de corte, onde era picada e transformada em cavacos, que eram lançados diretamente na carroceria de um caminhão que acompanhava a colhedora deslocando-se lado-a-lado. A avaliação foi realizada no estado americano do Texas, em áreas com *Prosopis glandulosa*, e no Novo

México, em áreas com *Tamarisk pentandra* e povoamentos de *Pinus edulis* e *Juniperus monosperma*. A colhedora mostrou-se capaz de cortar árvores individuais com 20 cm de diâmetro basal. Porém, mostrou-se mais eficiente no corte de vegetação densa, com árvores de diâmetro basal inferior a 10 cm (FELKER et. al, 1999).

A colhedora apresentou produtividade média de 0,95 ha/h (7.050 kg de biomassa verde por hora) em vegetação com diâmetro menor que 10 cm. O custo operacional foi estimado em 70,00 US\$/h (1,00 US\$/kJ). Os autores destacaram que este custo era competitivo com óleo combustível e gás natural. Apesar do potencial desta colhedora, os autores acrescentaram que a máquina não era suficientemente robusta para operar em condições florestais, uma vez que foi desenvolvida para condições agrícolas. Outro aspecto destacado foi a dificuldade do caminhão em acompanhar a colhedora nas adversidades das áreas florestais (FELKER et. al, 1999).

Atualmente, uma máquina colhedora-cavaqueadora *Fecon* FTX 440 vem sendo testada em sub-bosque florestal pela *North Carolina State University*. A máquina é capaz de cortar e cavaquear a biomassa com diâmetros de até 15 cm e lançar os cavacos diretamente em um container de reboque traseiro. Segundo os pesquisadores envolvidos no projeto, o uso desta colhedora é esperado, principalmente, em desbastes e redução de material combustível em sub-bosques. A colhedora-cavaqueadora foi testada em quatro condições diferentes: (a) florestas naturais de *Pinus* com 35,87 t/ha de biomassa no sub-bosque, composto por espécies folhosas com DAP entre 5 e 15 cm; (b) florestas naturais de *Pinus* com cerca de 157 e 179 t/ha de biomassa no sub-bosque, composto por plantas arbustivas numa densidade de 29.653 fustes/ha, com diâmetros entre 2,5 e 5,0 cm; (c) florestas naturais de *Pinus* com cerca de 2,2 e 4,5 t/ha de biomassa no sub-bosque, composto por plantas arbustivas numa densidade de 19.768 fustes/ha, com diâmetros entre 2,5 e 10,0 cm; (d) desbaste em plantações de *Pinus* com 12 anos de idade. A produtividade variou entre 1,4 e 6,5 toneladas verdes por hora produtiva. A colhedora-cavaqueadora mostrou-se mais produtiva em plantações, basicamente por trabalhar em linha reta e não necessitar de manobras entre as árvores. Um problema deste sistema, detectado no campo, foi a perda de cavacos devido à distância do reboque em relação a desgarga de cavacos, sendo maior durante as manobras da máquina (ROISE e HANNUM, 2008).

2.7. Impactos ambientais da geração de energia a partir da biomassa florestal

A utilização de fontes renováveis é uma medida ambiental, constituindo uma das maneiras de reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Cerca de 80% do consumo mundial de energia primária são baseados em combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) e a queima destes combustíveis é a principal responsável pela emissão de dióxido de carbono (CO₂), um dos responsáveis pelo aquecimento global e as mudanças climáticas (GOLDEMBERG, 1998).

Outra vantagem da geração de energia por biomassa está na eliminação e no aproveitamento de resíduos. A remoção dos resíduos florestais após a colheita apresenta certas vantagens, uma vez que a galhada representa entre 25 e 50% da biomassa total de uma árvore. A remoção dos galhos facilita o preparo do solo e plantio ou regeneração das árvores para o estabelecimento de uma nova floresta (HAKKILA, 1989). Além disso, também pode constituir um incentivo ao reflorestamento ou a um controle maior das florestas, que por sua vez promovem o sequestro de CO₂ atmosférico.

Entretanto, é necessário considerar a exportação de nutrientes do sítio causada pela remoção da biomassa florestal e a quantidade de combustível fóssil consumida pelo sistema de colheita desta biomassa.

2.7.1. Exportação de nutrientes

A manutenção da produtividade das florestas, tanto naturais como plantadas, está intimamente relacionada com a eficiência nos processos de ciclagem de nutrientes. Quantidades significativas de nutrientes retornam ao solo através da queda de componentes da planta, que vão sendo incorporados à serapilheira e sofrem o processo de decomposição. A medida em que esses componentes senescentes se decompõem, ocorre liberação de nutrientes ao solo, com consequente disponibilização para as plantas (POGGIANI, 1985).

O padrão de ciclagem de nutrientes em regiões tropicais é diferente do padrão de regiões temperadas. Nas regiões tropicais, as condições climáticas, com elevada temperatura e precipitação, favorecem a atividade microbiana, resultando na rápida decomposição da matéria orgânica e rápida ciclagem de nutrientes. Nas regiões temperadas, a decomposição é lenta e, por isso, uma grande parcela da matéria orgânica

e dos nutrientes permanece no solo, enquanto que, nos trópicos, uma porcentagem muito maior está na biomassa, que está sendo reciclada no sistema (ODUM, 1988).

As florestas tropicais são sustentadas pela reserva mineral contida na biomassa, ou seja, as florestas se auto sustentam por meio da ciclagem de nutrientes (RIZZINI, 1976). Os solos tropicais são, em sua grande maioria, pobres em nutrientes, intemperizados e lixiviados. Apresentam baixa capacidade de troca de cátions (Ca, Mg, K, Na), pouca fixação de potássio, grande capacidade de imobilizar fósforo e elevados teores de alumínio. Geralmente são ácidos e friáveis, sofrendo erosão por ocasião da alta precipitação (PRIMAVESI, 1982).

Por isso, a sustentabilidade produtiva dos sítios florestais apresenta-se como um dos desafios da silvicultura. A rápida taxa de crescimento das florestas plantadas no Brasil impõe elevada demanda sobre os recursos do solo, em especial água e nutrientes (BELLOTE et al., 2008). As espécies introduzidas no Brasil para fins de reflorestamento, principalmente do gênero *Eucalyptus*, permitem um ciclo de corte relativamente curto e uma elevada produtividade. Além disso, extensas áreas com plantios homogêneos têm sido implantadas sobre solos de menor fertilidade, devido ao menor custo de aquisição destas áreas (SCHUMACHER e POGGIANI, 1993).

Culturas de alta produtividade tendem a acumular grande quantidade de nutrientes, que são removidos por ocasião da colheita. O corte raso, praticado em plantios homogêneos, causa maiores impactos sobre o ciclo de nutrientes, gerando exposição da superfície do solo, que acelera a decomposição da matéria orgânica e aumenta as perdas por lixiviação (MILLER, 1995).

A exportação de nutrientes pela colheita é um dos fatores a ser considerado quando há preocupação com a manutenção da produtividade dos sítios, principalmente em solos de baixa fertilidade. As colheitas intensivas em rotações curtas, sem previsão de um período mínimo necessário para reposição de nutrientes, têm sido apontadas como as maiores responsáveis pelo esgotamento do solo (BELLOTE et al., 2008).

De modo geral, a quantidade de nutrientes exportados aumenta com a quantidade de biomassa removida (MILLER, 1995). Entretanto, a dimensão da exportação de nutrientes minerais, com a exploração de biomassa, está relacionada com uma série de fatores, como: espécie, qualidade do sítio, componente explorado, volume de biomassa explorada, taxa de produção de biomassa, densidade de plantio, idade de corte e perdas indiretas relacionadas no manejo da plantação (MÜLLER et al., 2005). O conhecimento do acúmulo e da alocação de nutrientes nos diversos componentes das

plantas permite ao silvicultor optar por técnicas de colheita que reduzam a exportação de nutrientes do sítio (SANTANA et al., 2008).

Durante o desenvolvimento de uma floresta equiânua, o crescimento inicial é concentrado nas folhas e raízes finas, causando rápida acumulação de nutrientes. Após o fechamento do dossel, até dois terços da demanda de nutrientes pode ser suprida pela retranslocação dos tecidos velhos para os novos, reduzindo a quantidade de material a ser reciclado na serrapilheira. Desta forma a floresta entra num equilíbrio entre a demanda e a disponibilidade de nutrientes (MILLER, 1995).

Pesquisadores estudaram a alocação de nutrientes em diversos plantios de eucalipto no Brasil e concluíram que até os 4,5 anos pós-plantio acumulam-se as maiores proporções de nutrientes (68% do N, 69% do P, 67% do K, 63% do Ca e 68% do Mg) para a idade de corte de 6,5 anos. A partir de 4,5 anos, a copa está totalmente desenvolvida e a ciclagem bioquímica torna-se mais expressiva, reduzindo a pressão sobre as reservas do solo. Após o estabelecimento da ciclagem bioquímica, até 66% da demanda de nutrientes considerados móveis pode ser suprida pela retranslocação. Os mesmos autores acrescentam também que, com o aumento da idade, há tendência de redução dos nutrientes alocados na copa e aumento dos nutrientes alocados no tronco (SANTANA et al., 2008).

Bellote et al. (1980a; 1980b) estudaram a acumulação e a extração de nutrientes em plantios de *Eucalyptus grandis*. Dos macronutrientes, o nitrogênio foi o que mais se acumulou nas folhas, e o cálcio, nas demais partes das plantas. Entre os macronutrientes, o Ca é o elemento mais extraído, vindo a seguir em ordem decrescente: N, K, S, Mg e P. O ferro foi o micronutriente que mais se acumulou nos ramos inativos e o manganês, nas demais partes das plantas. Entre os micronutrientes, o elemento extraído em maior quantidade foi o Mn, vindo a seguir em ordem decrescente: Fe, B, Cu, Zn e Mo.

A produção de biomassa e o conteúdo de nutrientes de plantios de eucalipto foram avaliados em diversos estudos. Em um plantio de *Eucalyptus globulus* com 4 anos de idade, a biomassa total da parte aérea foi de 83,2 t/ha, distribuída da seguinte forma: 13% em folhas, 10% em ramos, 9% em casca e 68% em madeira. Na madeira do tronco foram encontrados 29% de N; 29% de P; 40% de K; 12,5% de Ca e 34% de Mg. A copa concentra 64; 56; 48,5; 32 e 39% desses elementos, respectivamente. A casca acumulou as maiores quantidades de Ca (55,4% do total) (SCHUMACHER e CALDEIRA, 2001).

Em um plantio de *Eucalyptus saligna* com 8 anos de idade, estabelecido em solo arenoso e de baixa fertilidade, constatou-se que os troncos produziram 90 t/ha, enquanto que os resíduos florestais da copa (ramos e folhas) totalizaram 16 t/ha (cerca de 15% biomassa total). Entretanto, esses resíduos acumularam grande parte dos nutrientes contidos na biomassa: 38% do N; 37% do P; 28% do K; 27,6% do Ca e 35% do Mg (POGGIANI et al., 1983).

Também foram estudados plantios de um clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*, com diferentes densidades. Aos 24 meses de idade, entre 21 e 23% dos nutrientes estão alocados na copa, 63 a 67% estão alocados na casca e 11 a 16% estão alocados no lenho. Em espaçamento de 3 x 3 m, as quantidades de N-P-K-Ca-Mg foram, respectivamente, 25,17; 0,23; 6,08; 2,10 e 0,00 kg/ha na copa (folhas e ramos); 16,85; 1,31; 7,44; 63,99 e 8,40 kg/ha na casca; 7,34; 0,15; 7,71; 1,69 e 0,21 kg/ha na madeira. Neste espaçamento a distribuição dos nutrientes em termos relativos é a seguinte: Nitrogênio: 50,99% na copa (folhas e ramos), 34,13% na casca e 14,87% na madeira. Fósforo: 13,53% na copa, 77,69% na casca e 8,78% na madeira. Potássio: 28,64% na copa, 35,03% na casca e 36,33% na madeira. Cálcio: 3,09% na copa, 94,42% na casca e 2,49% na madeira. A biomassa total apresentou a seguinte distribuição: 22,09% copa, 66,71% lenho e 11,20 % casca (MÜLLER et al., 2005).

Schumacher e Poggiani (1993), estudando três espécies de eucalipto com idades entre 9 e 12 anos, observaram que o tronco (casca + lenho) representa em média 90% da biomassa, enquanto a copa (folhas + ramos) são responsáveis apenas por 10% do total. De uma forma geral, a distribuição dos nutrientes na árvore segue a seguinte tendência: folhas > ramos > casca > lenho. As três espécies de eucalipto estudadas apresentaram distribuição semelhante dos nutrientes, sendo que nas folhas foram verificadas as maiores concentrações de NPK e na casca maiores concentrações de Ca e Mg. Os autores também observaram que o *Eucalyptus grandis* foi a espécie que apresentou a maior produção de biomassa e a maior acumulação de nutrientes. Com 9 anos de idade, o *Eucalyptus grandis* acumulou, em média, 73% dos nutrientes estudados e devolveu apenas 27% para o solo. Para o *Eucalyptus camaldulensis*, a taxa de acumulação média foi de 33% e 67% dos nutrientes foram devolvidos ao solo. Segundo os autores, esta acumulação poderá, em médio prazo, diminuir a fertilidade, principalmente da camada superficial do solo.

Porém, se o solo conservar boa estrutura física, com condições favoráveis ao crescimento radicular, as camadas mais profundas também poderão contribuir para o

balanço nutricional. Solos com bons teores de matéria orgânica são melhor estruturados e menos densos. Isto possibilita um melhor desenvolvimento radicular, possibilitando que a planta mantenha um bom desenvolvimento, compensando a baixa disponibilidade de nutrientes. Assim, se o solo conservar boa estrutura física, com condições favoráveis ao crescimento radicular, as camadas mais profundas também poderão contribuir para o balanço nutricional (PRIMAVESI, 1982).

Santana et al. (1999) também estudaram a produção de biomassa e o conteúdo de nutrientes em diferentes procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*, aos 6,5 anos de idade em cinco localidades do Estado de São Paulo. Os conteúdos de nutrientes no tronco foram maiores nos melhores sítios, onde a produção de biomassa foi maior, sendo que o efeito do local foi mais importante para a produção do que o efeito do material genético.

A acumulação e a distribuição de nutrientes na árvore sofre influência de vários fatores, como espécie, idade, espaçamento, clima e solo. Há relação direta do volume e peso da biomassa seca com a densidade de plantio, ou seja, nos tratamentos com maiores densidades de plantio foram constatados os maiores volumes de madeira e peso de biomassa seca (MÜLLER et al., 2005). A concentração de nutrientes está correlacionada com o incremento volumétrico. De maneira geral, alguns autores observaram que quanto maior o diâmetro, maior é a concentração de nutrientes (POGGIANI et al., 1983). Alguns pesquisadores também observaram correlação positiva entre disponibilidade hídrica, produção de biomassa e concentração de nutrientes. Ou seja, em locais com maior disponibilidade de água, a produção de biomassa e a quantidade acumulada de nutrientes é maior (SANTANA et al., 2008).

Zwedie (2008) estudou as alterações na produtividade e nas propriedades do solo, em plantações de *Eucalyptus globulus* nos planaltos da Etiópia, explorados em curta rotação, por períodos de 12 a 60 anos (2 a 10 ciclos de corte). Observou-se uma acentuada queda de produtividade ao longo das rotações, sendo que a produtividade no décimo ciclo de corte foi 86% menor que nos primeiros cortes. Ao analisar o estoque de nutrientes no solo, o autor verificou um significativo empobrecimento do solo após dez ciclos de corte.

Como forma de repor os nutrientes removidos pela colheita, pode-se utilizar a aplicação de fertilizantes químicos ou as próprias cinzas da queima da biomassa. Moro e Gonçalves (1995), ao analisarem os efeitos da aplicação de cinzas em um plantio de *Eucalyptus grandis*, estabelecido em Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, sob clima

Cwa, no estado de São Paulo, observaram melhoria da fertilidade do solo e aumento da concentração de nutrientes em todas as partes das árvores, destacadamente para os nutrientes Ca e K. A aplicação de 20 t/ha de cinzas resultou num aumento de produtividade de 85,7 m³/ha (49%) em relação à testemunha. Os custos da aplicação das cinzas foram estimados no valor equivalente a 21 m³/ha de madeira com casca, considerando uma distância de transporte de até 65 km. Ou seja, os custos representam 25% do ganho de produção obtida com a aplicação de cinzas.

Um estudo avaliou o efeito de diferentes manejos de resíduos florestais no estado nutricional das árvores, no conteúdo de nutrientes na serapilheira e a biomassa de serapilheira produzida pelo *Eucalyptus grandis*. Foram avaliados quatro sistemas diferentes de manejo de resíduo: (i) remoção de todo resíduo do sítio proveniente da colheita florestal e adubação NPK; (ii) manutenção no sítio de todos os resíduos da colheita florestal e adubação NPK; (iii) remoção do sítio de todo o resíduo da colheita com diâmetro superior a 3 cm e adubação NPK; (iv) remoção de todos os resíduos da colheita, adubação NPK e adição de 15 t/ha de resíduo celulósico + 4 t/ha de cinza de madeira (relação C:N igual a 25:1 e 30:1, respectivamente). Estatisticamente, as árvores do tratamento (iv) foram as que apresentaram maior produtividade, mostrando diferença significativa em relação aos demais tratamentos avaliados. Os resultados mostram maior efeito dos resíduos industriais (cinza de caldeira e lodo celulósico) sobre o crescimento das árvores do que a manutenção dos resíduos da colheita florestal. Os autores explicam que essa diferença entre o tratamento (iv) e os tratamentos (ii) e (iii) pode-se referir à qualidade dos resíduos industriais (BELLOTE et al., 2008).

O resíduo celulósico é quase que totalmente decomposto (relação C:N próxima de 12:1) e tem ação imediata sobre as propriedades do solo. A cinza apresenta os nutrientes na forma mineralizada e prontamente disponível para as plantas. Por outro lado, os resíduos da colheita, pelo fato de encontrarem-se ainda em fase de decomposição, necessitam de um período maior no solo, até atingir um estágio adequado de decomposição para atuar como fornecedor de nutrientes para as árvores e condicionador do solo. Os autores acrescentam que, a adição de resíduo celulósico e cinza de caldeira no solo contribuem com uma maior ciclagem de nutrientes e são importante fonte de nutrientes minerais para as árvores. Além de fornecedores de nutrientes, esses resíduos, por suas características, são excelentes opções para o acréscimo do conteúdo de matéria orgânica no solo. Em condições tropicais, o acréscimo de matéria orgânica no solo tem reflexos significativos na melhoria das

propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Todos esses fatores contribuem para a sustentabilidade do solo e incremento da produção florestal. Portanto, sistemas de colheita que removem, além do fuste comercial, também a casca, a ponteira e galhos grossos, poderiam ser compensados com a adição de resíduo celulósico e cinza de caldeira (BELLOTE et al., 2008).

As cinzas resultantes da combustão de biomassa florestal têm sido destacadas pelas suas características físicas e químicas, com potencial de utilização como fonte de nutrientes para as árvores e como agente capaz de melhorar as condições físicas e químicas do solo. O efeito significativo da cinza no aumento da produtividade florestal já foi verificado por diversos pesquisadores. Constatou-se que a aplicação de cinza em povoamentos florestais resulta em consideráveis elevações de produtividade em relação à testemunha (PEREIRA et al., 1982; STAPE e BALLONI, 1988; MORO e GONÇALVES, 1995; GONÇALVES e MORO, 1995).

Outras alternativas para minimizar a exportação de nutrientes incluem a manutenção de parte dos resíduos da colheita no campo. Na Finlândia, um terço dos resíduos resultantes da colheita florestal é deixado na floresta para decomposição e ciclagem de nutrientes (KALLIO e LEINONEN, 2005).

2.7.2. Balanço energético

As máquinas empregadas na colheita de biomassa florestal consomem combustível e lubrificantes. Esse consumo de energia fóssil não renovável deve ser quantificado e comparado com a quantidade de energia contida na biomassa produzida. Somente a partir desse balanço energético é que se pode evidenciar a vantagem da colheita mecanizada de biomassa florestal para geração de energia.

A análise energética de dois sistemas de colheita mecanizada de eucalipto concluiu que o maior consumo de energia nos sistemas de colheita mecanizada, seja pelo sistema de toras longas ou de toras curtas, foi devido ao fluxo de energia direta proveniente do consumo de combustível, cerca de 93,3% do total. O maior consumo de energia, em todo o processo de produção de madeira de eucalipto, está na operação de transporte rodoviário $41,92 \text{ MJ/m}^3$, seguido pela colheita com $41,53 \text{ MJ/m}^3$ no sistema de toras longas e $36,73 \text{ MJ/m}^3$ no sistema de toras curtas. Do investimento energético para formar e colher um hectare de eucalipto, a atividade de colheita e transporte

consumiu cerca de 60% do total, em ambos os sistemas de colheita estudados. A produção energética da madeira de eucalipto considerada nesse estudo foi cerca de 62 vezes maior que a energia investida em todo o ciclo produtivo (OLIVEIRA JR, 2005).

3. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2002. 153 p.

ALAKANGAS, E. **Properties of wood fuels used in Finland**. Jyväskylä, Finland: VTT, 2005. 90 p. (Project Report PRO2/P2030/05).

ALAKANGAS, E.; SAURANEN, T.; VESISENAHO, T. **Production techniques of logging residue chips in Finland**. Jyväskylä, Finland: VTT, 1999. 84 p. (Training manual ENE39/T0039/99).

ALLAN BRUKS. **ABAB Carrier**. Disponível em: <<http://www.allanbruks.se/en/produkter/abab-carrier>>. Acesso em: 15 fev. 2008.

ANDIS, L.; HENRIK, V.H.; LAZDINA, D.; VALENTINS, L. Productivity and costs of stump harvesting for bioenergy production in Latvian conditions. **Engineering for rural development**, n. 28, 2009. p. 194-201.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário Estatístico**: ano base 2006. Brasília: ABRAF, 2007. 80 p.

BAUER, S.R.T. **Resíduos da exploração florestal de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden para geração de energia elétrica**. Botucatu: UNESP, 2001. 54 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

BELLOTE, A.F.J.; DEDECEK, R.A.; SILVA, H.D. Nutrientes minerais, biomassa e deposição de serapilheira em plantio de *Eucalyptus* com diferentes sistemas de manejo de resíduos florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 56, 2008. p. 31-41.

BELLOTE, A.F.J.; SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P.; OLIVEIRA, G.D. Extração e exploração de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden em função da idade: 1 – Macronutrientes. **Revista IPEF**, n. 20, 1980. p. 1-23. a

BELLOTE, A.F.J.; SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P.; OLIVEIRA, G.D. Extração e exploração de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden em função da idade: 2 – Micronutrientes. **Revista IPEF**, n. 20, 1980. p. 27-45. b

BJÖRHEDEN, R.; GULLBERG, T.; JOHANSSON, J. Systems analyses for harvesting small trees for forest fuel in urban forestry. **Biomass and Bioenergy**, v. 23, 2003. p. 389-400.

BRAND, M.A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. Curitiba: UFPr, 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2009 – Ano base 2008**: Resultados Preliminares. Rio de Janeiro: EPE, 2009. 48 p.

BRASIL. **Diretrizes de política de agroenergia 2006 - 2010**. Brasília: MAPA, MCT, MME, MDIC, 2005. 33 p.

BRIDGEWATER, T. Biomass for energy. **Journal of the science of food and agriculture**, v. 86, 2006. p. 1755-1768.

BRIDGEWATER, A.V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v. 91, 2003. p. 87-102.

BRITO, J.O. Madeira para a floresta: a verdadeira realidade do uso de recursos florestais. **Silvicultura**, v. 11, n. 41, 1986. p. 188-193.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. **Circular Técnica IPEF**, n. 52, 1979. 7 p.

CARPIENTIERI, A.E.; LARSON, E.D.; WOOD, J. Future biomass-based electricity supply in Northeast Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 4, n. 3, 1993. p. 149-173.

CHAIZE, T. **Oil, population and peak of production**. Disponível em: <<http://dani2989.com/matiere1/oilpopulationprod26112006gb.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2007.

CHRISTOPHERSON, N.; STOKES, B.; WISELOGEL, A.; WOODFIN, S.; ZERBE, J. Harvesting and handling fuelwood. In: FAZIO, J.R. (Ed.). **Trees for fuelwood: a step toward energy diversity**. Nebraska City, NE, US: The Arbor Day Institute, 1993. 80 p. Cap. 3, p. 34-44.

COELHO, S.T. **Mecanismo para implementação da co-geração de eletricidade a partir da biomassa. Um modelo para o Estado de São Paulo**. São Paulo: USP, 1999. 200 f. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

COELHO, S.T. Biofuels - Advantages and Trade Barriers. In: UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT, 2005, Genebra. Disponível em: <http://www.unctad.org/en/docs/ditcted20051_en.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2007.

CONTINENTAL BIOMASS INDUSTRIES – CBI. **Brush Transport System**. Disponível em: <http://www.cbi-inc.com/pdfs/BTS_DS_DR11.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2008.

CORRÊA NETO, V. **Análise de viabilidade da co-geração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2001. 194 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; AYARZA, J.A.C. Biomassa no Brasil e no mundo. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; E.O. GÓMEZ (Eds). **Biomassa para energia**. São Paulo: UNICAMP, 2008. 736 p. Cap. 1, p. 15-29.

COUTO, L.; MÜLLER, M.D. Florestas energéticas no Brasil. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; E.O. GÓMEZ (Eds). **Biomassa para energia**. São Paulo: UNICAMP, 2008. 736 p. Cap. 4, p. 93-111.

CUCHET, E.; ROUX, P.; SPINELLI, R. Performance of a logging residue bundler in the temperate forests of France. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, 2004. p. 31-39.

CULSHAW, D.; STOKES, B. Mechanisation of short rotation forestry. **Biomass and Bioenergy**, v. 9, 1995. p. 127-140.

FELFILLI, J.M.; VALE, A.B.; PAULA NETO, F.; REZENDE, J.L.P. Avaliação dos resíduos de exploração em florestas no Norte de Mato Grosso. **Revista Árvore**, v. 8, n. 1, 1984. p. 70-83.

FELKER, P.; McLAUHLAN, R.A.; CONKEY, A.; BROWN, S. Case study: development of a swath harvester for small diameter (<10 cm) woody vegetation. **Biomass and Bioenergy**, v. 17, 1999. p. 1-17.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATION – FAO. **Energy conservation in the mechanical forest industries**. Roma: FAO, 1990. 130 p. (FAO Forestry Paper, n. 93).

FOREST RESEARCH. **Stump Harvesting**: Interim Guidance on Site Selection and Good Practice. UK: The Research Agency of the Forestry Commission, 2009. 18 p.

FOREST RESEARCH. **Harvesting and comminution of short rotation coppice**. UK: The Research Agency of the Forestry Commission, 1998. 12 p. (Technical Note 8/98).

FRANÇA, R. 70 questões para entender o etanol. **Revista Veja**, ed. 2052, 19 mar. 2008. Disponível em: <http://veja.abril.com.br/190308/p_104.shtml>. Acesso em: 29 mai. 2008.

FRIDLEY, J.L.; BURKHARDT, T.H. Densifying forest biomass into large round bales. **Transactions of the ASAE**, v. 27, n. 5, 1984. p. 1277-1281.

FULLER, W.S. Chip pile storage – a review of practices to avoid deterioration and economic losses. **Tappi Journal**, v. 68, n. 8, 1985. p. 48-52.

GRAF, A.; KOEHLER, T. **Oregon cellulose-ethanol study: an evaluation of the potential for ethanol production in Oregon using cellulose-based feedstocks.** Salem, OR, US: Oregon Office of Energy and Bryan & Bryan, Inc, 2000. 96 p.

GOLDEMBERG, J. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento.** São Paulo: Ed. USP, 1998. 125 p.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L.D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento.** São Paulo: Ed. USP, 2003. 226 p.

GOMES, S.I.; PARAÍSO, P.R.; ANDRADE, C.M.G. **Análise preliminar da viabilidade de cultivos florestais para a geração de energia elétrica.** Disponível em: <http://www.stef.com.br/artigos/espaco_energia.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2007.

GONÇALVES, A.R.; BENAR, P.; SCHUCHARDT, U. Liquefação de biomassas. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; E.O. GÓMEZ (Eds). **Biomassa para energia.** São Paulo: UNICAMP, 2008. 736 p. Cap. 12, p. 419-434.

GOLÇALVES, J.L.M.; MORO, L. Uso da cinza de biomassa florestal como fonte de nutrientes em povoamentos puros de *Eucalyptus grandis*. **Revista IPEF**, n. 48/49, 1995. p. 28-37.

GUARDABASSI, P.M. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia perspectivas para países em desenvolvimento.** São Paulo: USP, 2006. 123 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

HAKKILA, P. **Developing technology for large-scale production of forest chips.** Helsinki, Finland: Tekes, 2004. 99 p. (Wood Energy Technology Programme 1999–2003. Final Report 6/2004).

HAKKILA, P. **Utilization of residual forest biomass.** Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1989. 568 p. (Springer Series in Wood Science).

HAKKILA, P. **Mechanized harvesting of stump and roots:** A sub-project of the Nordic research programme for the utilization of logging residues. Helsinki, Finland: Fenniae, 1972. 69 p.

HAMELINCK, C.N.; HOOIJDONK, G.; FAAIJ, A. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, 2005. p. 384-410.

HARTSOUGH, B.; YOMOGIDA, D. **Compilation of state-of-the-art mechanization technologies for short-rotation woody crop production.** Palo Alto, CA, US: Electric Power Research Institute, 1996. 66 p.

INCE, P.J. **Estimating effective heating value of wood or bark fuels at various moisture contents.** Madison, WI, US: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1977. 9 p. (Gen. Tech. Report FPL 13).

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA – IEA. **Valor de terra nua**. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/banco/menu.php>>. Acesso em: 15 jan. 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **World Energy Outlook 2006**. France: IEA, 2006. 600 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **World Energy Investment Outlook 2003**. France: IEA, 2003. 511 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **World Energy Outlook 2002**. France: IEA, 2002. 530 p.

JACOVINE, L.A.G. **Gestão da qualidade na colheita de madeira em povoamentos eqüiâneos**. Viçosa: UFV, 2000. 136 p. Tese (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

JACOVINE, L.A.G. ; MACHADO, C.C.; SOUZA, A.P.; LEITE, H.G. Avaliação da perda de madeira em cinco subsistemas de colheita florestal. **Revista Árvore**, v. 25, n. 4, 2001. p. 463-470.

JIRJIS, R. Storage and drying of wood fuel. **Biomass and Bioenergy**, v. 9, 1995. p. 181-190.

KALLIO, M; LEINONEN, A. **Production technology of forest chips in Finland**. Jyväskylä, Finland: VTT, 2005. 103 p. (Project Report PRO2/P2032/05).

KÄRHÄ, K.; VARTIAMÄKI, T. Productivity and costs of slash bundling in Nordic conditions. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, 2006. p. 1043-1052.

KOCH, P.; COUGHRAN, S. Development of a puller-buncher for harvesting southern pines with tap root attached. **Forest Products Journal**, v. 24, n. 4. p. 23-30.

LAITILA, J.; RANTA, T.; ASIKAINEN, A. Productivity of stump harvesting for fuel. **International journal of forest engineering**, v.19, n. 2, 2008. p. 37-47.

LARSSON, M.; CARLSSON, T. Trucking of logging residues and tree sections. In: INTERNATIONAL FPSR INDUSTRIAL WOOD ENERGY FORUM, 6, 1982, Washington, DC, US. **Proceedings...** Madison, WI, US: Forest Products Research Society, 1982. p. 137-148.

LAVOIE, F.; SAVOIE, P.; D'AMOURS, L.; JOANNIS, H. Development and field performance of a willow cutter-shredder-baler. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CROP HARVESTING AND PROCESSING, 2007, Louisville, KY, US. **Proceedings...** Louisville, KY, US: ASABE, 2007. (ASABE Publication Number 701P0307e).

LEINONEN, A. **Harvesting technology of forest residues for fuel on the USA and Finland**. Espoo, Finland: VTT, 2004. 132 p. (Research Notes 2229).

LIMA, C.R. Madeira: fonte alternativa e renovável de energia. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4, 1992, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EESC/USP, 1992. p. 91-104.

LÓPEZ, L.P.; UDAETA, M.M.; GERALDO, B. O Brasil e a integração energética. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP, 2008. CD-ROM.

LORA, E.E.S.; ANDRADE, R.V.; ARADAS, M.E.C. Geração elétrica em pequena escala a partir da gaseificação de biomassa. In: AGRENER GD 2004 - Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, 5, 2004, Campinas. **Anais...** Campinas: AGRENER GD 2004, 2004. CD-ROM.

LORA, E.S.; COBAS, V.R.M.; PAULA, R.B. Outras tecnologias para a geração de eletricidade em pequena escala a partir da biomassa: motor Stirling, células a combustível, microturbinas. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; E.O. GÓMEZ (Eds). **Biomassa para energia**. São Paulo: UNICAMP, 2008. 736 p. Cap. 18, p. 609-632.

LUCON, O.; COELHO, S. Depois da Rio + 10: as lições aprendidas em Joanesburgo. **Revista do Departamento de Geografia da USP**, n. 15, 2002. p. 11-18.

LYND, L.R.; CUSHMAN, J.H.; NICHOLS, R.J.; WYMAN, C.E. Fuel ethanol from cellulosic biomass. **Science**, New Series, v. 251, n. 4999, 1991. p. 1318-1323.

MACEDO, I.C. **Estado da arte e tendências das tecnologias para energia**. Brasília: CGEE, 2003. 76 p.

MACEDO, I.C. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil**: situação atual, oportunidades e desenvolvimento. Brasília: CGEE, 2001. 10 p.

MARTÍ, B.V. Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. **Revista Ecosistemas**, n. 1, 2006. Disponível em: <<http://www.revistaecosistemas.net/pdfs/402.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2007.

MILLER, H.G. The influence of stand development on nutrient demand, growth and allocation. **Plant and Soil**, n. 168-169, 1995. p. 225-232.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **PROINFA**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa>>. Acesso em: 12 nov. 2009.

MORITA, S. **Energia renovável para o Brasil – eletrificação rural neutra em carbono**. Disponível em: <<http://www.bizpoint.com.br/jp/reports/morita/030227.htm>>. Acesso em: 30 jun. 2007.

MORO, L.; GOLÇALVES, J.L.M. Efeito da cinza de biomassa florestal sobre a produtividade de povoamentos puros de *Eucalyptus grandis* e avaliação financeira. **Revista IPEF**, n. 48/49, 1995. p. 18-27.

MÜLLER, M.D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de Eucalipto em Itamarandiba, MG**. Viçosa: UFV, 2005. 94 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

MÜLLER, M.D.; COUTO, L.; NEVES, J.C.L. Produção de biomassa e balanço nutricional de plantações de eucalipto clonal em diferentes densidades de plantio no município de Itamarandiba-MG. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 2, 2005. p. 91-101.

NATIONAL AGRICULTURAL STATISTICS SERVICE – NASS. **Land values and cash rents 2007 Summary**. United States: USDA, 2007. 20 p.

NOGUEIRA, L.A.O. **Uso de biomassa florestal para geração elétrica em grande escala: o projeto "WBP-SIGAME" brasileiro**. In: REUNIÓN REGIONAL SOBRE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE BIOMASA, 1995, Montevideo. **Anais...** Santiago: FAO, 1996. (Série Florestal, n. 7).

NOGUEIRA, L.A.O.; WALTER, A.C.S. **Experiências de geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: aspectos técnicos e econômicos**. In: REUNIÓN REGIONAL SOBRE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE BIOMASA, 1995, Montevideo. **Anais...** Santiago: FAO, 1996. (Série Florestal, n. 7).

NOLASCO, A.M. Análise quantitativa dos resíduos da extração e processamento da caixeta (*Tabebuia cassinoides*) no Vale do Ribeira-SP. In: WORKSHOP SUL-AMERICANO SOBRE USOS ALTERNATIVOS DE RESÍDUOS DE ORIGEM FLORESTAL E URBANA, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Embrapa Florestas, 1997. p. 113-116.

NORTHERN WOOD HEAT. **Stumps and roots as woodfuel**. Disponível em: <http://elearn.ncp.fi/materiaali/kainulainens/nwh/woodfuel_supply_chains/forest_chips/stumps.htm>. Acesso em: 10 jul. 2007.

NURMI, J. The storage of logging residue for fuel. **Biomass and Bioenergy**, v. 17, 1999. p. 41-47.

NURMI, J. Heating values of mature trees. **Acta Forestalia Fennica**, n. 256, 1977. 28 p.

ODDONE, D.C. **Co-geração: uma alternativa para produção de eletricidade**. São Paulo: USP, 2001. 82 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 434 p.

OLIVEIRA JR., E.D. **Análise energética de dois sistemas de colheita mecanizada de eucalipto**. Piracicaba: ESALQ, 2005. 76 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

PEREIRA, A.R.; BARROS, N.F.; FLORES, A.C. Uso da moínha de carvão vegetal como fonte de nutrientes em povoamentos de eucaliptos. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4, 1982, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBS, 1982. p. 416-417.

PEREIRA JR, V.B. **Alternativas para co-geração de energia em uma indústria de chapas de fibra de madeira**. Botucatu: UNESP, 2001. 100 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

POGGIANI, F. **Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus*: implicações silviculturais**. Piracicaba: ESALQ, 1985. 211 f. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1985.

POGGIANI, F.; DO COUTO, H.T.Z.; CORRADINI, L.; FAZZIO, E.C.M. Exportação de biomassa e nutrientes através da exploração dos troncos e das copas de um povoamento de *Eucalyptus saligna*. **Revista IPEF**, n. 25, 1983. p. 37-39.

POTTIE, M.A.; GUIMIER, D.Y. **Preparation of forest biomass for optimal conversion**. Canada: FERIC/IEA, 1985. 112 p. (FERIC Special Report SR-32/IEA Cooperative Project CPC3).

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 4. ed. São Paulo: Nobel, 1982. 541 p.

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEREDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa e Energia**, v. 1, n. 2, 2004. p. 173-182.

QUIRINO, W.F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Vol. 1. Brasília: Via Brasil, 2002. 32 p.

RANTA, T.; HALONEN, P.; ALAKANGAS, E. **Production of forest chips in Finland**. Finland: OPET Finland/VTT Energy, 2001. 58 p. (OPET Report 6).

RANTA, T.; RINNE, S. The profitability of transporting uncomminuted raw materials in Finland. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, 2006. p. 231-237.

RIZZINI, C.T. **Tratado de fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos**. Vol. 1. São Paulo: HUCITEC/USP, 1976. 327 p.

ROISE, J.P.; HANNUM, L. The Kraken: Testing the FECON harvesting machine for small diameter woody biomass. In: ANNUAL MEETING OF THE COUNCIL ON FOREST ENGINEERING, 31, 2008, Charleston, SC, US. **Proceedings...** BAKER, S.A.; BOLDING, M.C.; GREENE, W.D. (Eds.). Athens, GA, US: Warnell, Georgia University, 2008. CD-ROM.

RÖSER, D.; SIKANEN, L. **Developing small and medium scale woodfuel supply chains**. In: NORTHERN WOOD HEAT – WOODFUEL TRAINING COURSE. Disponível em: <http://elearn.npc.fi/materiaali/kainulainens/nwh/woodfuel_supply_chains/>. Acesso em: 10 jul. 2007.

RUMMER, B.; LEN, D.; O'BRIEN, O. **Forest residues bundling project - new technology for residue removal**. Auburn, AL, US: Forest Operations Research Unit, USDA Forest Service, 2004. 18 p.

- SANTANA, R.C.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. *Scientia Forestalis*, n. 56, 1999. p. 155-169.
- SANTANA, R.C.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; LEITE, H.G.; COMERFORD, N.B. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, Número Especial, 2008. p. 2723-2733.
- SAVOIE, P.; D'AMOURS, L.; LAVOIE, F.; LECHASSEUR, G.; JOANNIS, H. Development of a cutter-shredder-baler to harvest long-stem willow. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2006, Portland, OR, US. **Proceedings...** Portland, OR, US: ASABE, 2006. (Paper Number 061016).
- SCHUMACHER, M.V.; CALDEIRA, M.V.W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie maidenii. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 1, 2001. p. 45-53.
- SCHUMACHER, M.V.; POGGIANI, F. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus torelliana* F. Muell, plantados em Anhembi, SP. **Ciência Florestal**, v. 3, n. 1, 1993. p. 21-34.
- SIROIS, D.L. The Nicholson-Koch mobile chip harvester system. In: INTERNATIONAL FPRS INDUSTRIAL WOOD ENERGY FORUM, 6, 1982, Madison, WI, US. **Proceedings...** Madison, WI, US: Forest Products Research Society, 1982. p. 100-105.
- SIROIS, D.L. A mobile harvester for utilization of weed trees and residues. In: JOHN S. WRIGHT FORESTRY CONFERENCE, Weed control in forest management, 1981, West Lafayette, IN, US. **Proceedings...** Lafayette, IN, US: Purdue University, 1981. p. 177-194. a
- SIROIS, D.L. Some engineering aspects of the Nicholson-Koch Mobile Chipper. In: ASAE SUMMER MEETING, 1981, Orlando, FL, US. **Proceedings...** St. Joseph, MI, US: ASAE, 1981. 11 p. (Paper Number 81-1077). b
- SIROIS, D.L. Feasibility of harvesting southern hardwood trees by extraction. In: ASAE MEETING, 1977, Chicago, IL, U.S. **Proceedings...** St. Joseph, MI, US: ASAE, 1977. 16 p. (ASAE Paper 77-1567).
- SIROIS, D.L.; RAWLINS, C.L.; STOKES, B.J. Evaluation of moisture reduction in small diameter trees after crushing. **Bioresource Technology**, v. 37, 1991. p. 53-60.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. **Fatos e Números do Brasil Florestal**. [São Paulo]: SBS, 2006. 105 p.
- SPINELLI, R.; HARTSOUGH, B.R. Extracting whole short rotation trees with a skidder and a front-end loader. **Biomass and Bioenergy**, v. 21, 2001. p. 425-431.

SPINELLI, R., NATI, C.; MAGAGNOTTI, N. Harvesting and transport of root biomass from fast-growing poplar plantations. **Silva Fennica**, v. 39, n. 4, 2005. p. 539–548.

SPRINGER, E.L. **Should whole-tree chips for fuel be dried before storage?** Madison, WI, US: USDA Forest Service, Forest Products Lab, 1980. 5 p. (Research Note FPL-0241).

STAPE, J.L.; BALLONI, E.A. O uso de resíduos da indústria de celulose como insumos na produção florestal. **Revista IPEF**, n. 40, 1988. p. 33-37.

STOKES, B.J.; SIROIS, D.L.; WOODFIN, S.L. Preliminary evaluation of steel-roller round baler for woody biomass baling. In: ANNUAL MEETING OF THE SOUTHERN FOREST BIOMASS WORKSHOP, 9, 1987, Biloxi, MS, US. **Proceedings...** Mississippi State, MS, US: Department of Forestry, 1987. p. 167-174.

STOKES, B.J.; FREDERICK, D.J.; CURTIN, D.T. Field trials of a short-rotation biomass feller-buncher and selected harvesting systems. **Biomass**, n. 11, 1986. p. 185-204.

STUPAK, I.; ASIKAINEN, A.; RÖSER, D.; PASANEN, K. Review of recommendations for forest energy harvesting and wood ash recycling. In: RÖSER, D.; ASIKAINEN, A.; RAULUND-RASMUSSEN, K.; STUPAK, I. (Eds.). **Sustainable use of forest biomass for energy**. Denmark: Springer, 2008. 262 p. Chapter 7, p. 155-196.

VIANNA, A.; VIEIRA, L.S.R.; NASCIMENTO, M.V. **Manual de aplicação de sistemas descentralizados de geração de energia elétrica para projetos de eletrificação rural – Energia Biomassa – versão 1**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2000. 41 p. (Relatório Técnico ADG-A / PER - 789/00).

WATSON, W.F.; SABO, R.F.; STOKES, B.J. Productivity of in-woods chippers processing understory biomass. In: COUNCIL ON FOREST ENGINEERING, Improving Productivity through Forest Engineering, 1986, Mobile, AL, US. **Proceedings...** Mobile, AL, US: Council on Forest Engineering, 1986. p. 69-72.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **Pathways to 2050: Energy & Climate Change**. Switzerland: WBCSD, 2005. 23 p.

ZEWDIE, M. **Temporal changes of biomass production, soil properties and ground flora in *Eucalyptus globulus* plantations in the central highlands of Ethiopia**. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2008. 74 f. Thesis (Doctorate in Agricultural Sciences) – Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 2008.

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE CAVAQUEAMENTO DE PONTEIRAS DE EUCALIPTO PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

RESUMO – O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho e estimar os custos de um sistema de cavaqueamento de ponteiros de eucalipto, resultantes da colheita florestal, para aproveitamento energético, em uma empresa de base florestal localizada no Estado do Pará, na Região Norte do Brasil. O sistema era composto por um picador florestal, dois tratores florestais autocarregáveis (com grua) e uma carregadora frontal. A coleta de dados baseou-se em estudo de tempos, determinação do consumo de combustível e pesagem dos cavacos produzidos. A produtividade média do sistema foi de 17,51 t/he. A eficiência operacional foi de 51,9%, devido a diversas demoras operacionais, principalmente para conserto e manutenção. O carregamento dos veículos de transporte com os cavacos produzidos pelo picador foi considerado ponto de estrangulamento do sistema, devido a ocorrências de falta de caminhão disponível no local. O sistema produziu entre 94 e 162 vezes mais energia do que consumiu e o seu custo foi de R\$ 376,56/he, o que representa R\$ 21,51/t de cavacos ou R\$ 2,70/GJ.

Palavras-chave: resíduos florestais, cavaqueamento, picador, energia renovável.

EVALUATION OF A WOOD CHIPPING SYSTEM FOR COMMUNUTE EUCALYPTUS' TOPS FOR ENERGY

ABSTRACT – The objective of this study was to evaluate the performance and to estimate costs of a wood chipping system for comminuting tree tops, which are considered residues from wood harvesting, to be used for energy. The study was developed in a forest industry in the Para State, located in the North Region of Brazil. The system was comprised by one wood chipper, two forest tractors equipped with knuckleboom grapple and one front loader. Data collection was based on time study, fuel consumption and chips loads weighting. System average productivity was 17.51 tonnes per effective hour. Machine utilization rate was 51.9% due to many delays, mainly for repair and maintenance. Blowing chips to trucks was considered to be the

critical point of the system, due to some lack of trucks available for changing of vain. The system produced between 94 and 162 times more energy than consumed. System cost per effective hour was R\$ 376.56, which means R\$ 21.51/tonne of chips or R\$ 2.70/GJ.

Key-words: forest residues, wood chipping, chipper, renewable energy.

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia por biomassa florestal apresenta vantagens ambientais, pela substituição de combustíveis fósseis e redução da emissão de gases de efeito estufa, e vantagens sociais, pela geração de empregos locais. Os resíduos da colheita florestal, que geralmente são deixados no campo, são potenciais fontes de energia renovável. Infere-se que menos de dois terços de uma árvore é retirado da floresta para a comercialização (FAO, 1990).

O aumento do aproveitamento de florestas comerciais existentes está entre as vantagens econômicas da utilização dos resíduos florestais. As empresas de base florestal, que possuem grandes áreas florestadas e produzem grande quantidade de resíduos, podem diminuir sua dependência energética ou mesmo se tornarem auto-suficientes em energia. Essa vantagem é ainda mais evidente em localidades isoladas, especialmente na região amazônica, devido à indisponibilidade de energia produzida por hidrelétricas e ao alto custo dos combustíveis fósseis nessa região.

Para essas empresas, a utilização desses resíduos também constitui um fator importante na interface entre a colheita e a silvicultura. A remoção dos resíduos da área, após o encerramento das atividades de colheita, facilitará as operações subsequentes de preparo do solo e implantação do novo plantio florestal, com conseqüente redução dos custos de produção (LOPES et al., 2005).

Mas, apesar do grande potencial de aproveitamento, os resíduos florestais ainda não são plenamente utilizados devido, muitas vezes, aos custos de coleta e transporte, que tornam a biomassa florestal para energia pouco atrativa economicamente.

Nesse sentido, um aspecto de crucial importância no aproveitamento dos resíduos florestais diz respeito à concentração da biomassa. Uma vez concentrado o material, seu transporte poderá ser economicamente viabilizado. Por esta razão, as

tecnologias de coleta e aproveitamento de resíduos florestais têm se baseado no aumento da densidade do material (MARTÍ, 2006).

Entre essas tecnologias, destacam-se os sistemas de cavaqueamento de resíduos florestais, que abrem a possibilidade de aproveitar sortimentos desinteressantes, do ponto de vista econômico, e torná-los matéria-prima homogênea. Além de uniformizar o material e facilitar o seu manuseio e transporte final, o cavaqueamento no campo constitui-se de uma maneira de acelerar a secagem da biomassa florestal, tornando-a mais apropriada ao consumo industrial (SALMERON, 1980).

Diante disso, este trabalho teve o objetivo de avaliar o desempenho e estimar os custos de um sistema de cavaqueamento de ponteiros de eucalipto resultantes da colheita florestal, para aproveitamento energético, em uma empresa de base florestal localizada na Região Norte do Brasil. Objetivou-se, ainda, determinar o balanço energético desse sistema.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área do estudo

Este trabalho foi realizado na Empresa Jari Celulose S.A., localizada às margens do Rio Jari, no distrito Monte Dourado, Município de Almeirim, Estado do Pará. A empresa possui cerca de 1,7 milhão de hectares distribuídos entre os Estados do Pará e do Amapá. Atualmente, cerca de 60 mil hectares são plantados com eucalipto para a produção de celulose. O consumo anual de madeira de eucalipto para celulose, com diâmetro comercial mínimo de 5 cm, é de 1,55 milhão de toneladas.

Segundo a classificação de Köppen, a região se caracteriza por clima Am, com características intermediárias entre Af e Aw, cujo regime pluviométrico define uma curta estação seca, entre os meses de setembro e novembro. A precipitação média anual é de 2.115 mm e as temperaturas mensais são elevadas durante todo o ano, com média anual de 26,4°C. O solo da área onde foi realizado este trabalho é do tipo Latossolo Amarelo Álico, com textura arenosa média (CORRÊA et al., 1989).

A declividade da área onde foi realizado este trabalho varia entre 0° e 3°. A área continha plantio homogêneo de híbridos *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (urograndis). O Quadro 1 apresenta as características dendrométricas do plantio.

Quadro 1. Valores médios das parcelas amostrais do inventário pré-corte.

Idade (anos)	4,7
Árvores/ha	1008
Altura Dominante (m)	27,5
Altura Média (m)	22,0
DG - Diâmetro da árvore de área basal média (cm)	15,4
Quantidade total com casca (t/ha)	200,1

Estima-se que as ponteiros representem entre 8 e 10% do volume total da árvore, tendo comprimento médio de 6 metros. Para minimizar os impactos da exportação de nutrientes, devido à remoção dos resíduos florestais, a empresa estabeleceu que seria feito o aproveitamento das ponteiros em apenas uma rotação do plantio. Além disso, como o desgalhamento do sortimento comercial é realizado dentro do plantio, os galhos permanecem no campo para a ciclagem de nutrientes no solo, bem como parte das folhas das ponteiros que, por motivos climáticos da região, caem em curto período de tempo após a colheita. As cinzas resultantes da produção energética não têm sido aproveitadas devido ao alto custo de transporte e disposição no campo, que inviabiliza economicamente esse aproveitamento (GUZZO, 2009⁶).

2.2. Descrição da colheita de madeira

O sistema de colheita empregado, que possibilitava o aproveitamento das ponteiros, era composto por Feller-buncher⁷, Skidder e Garra Traçadora. Após a etapa de corte, realizada por Feller-buncher, era realizado o desgalhamento manual das árvores dentro do povoamento. Em seguida, os feixes de árvores desgalhadas eram arrastados por Skidder para as margens das estradas. O destopamento e o traçamento eram realizados por Garra Traçadora. Nesta etapa, as toras traçadas eram empilhadas nas margens das estradas e as ponteiros eram empilhadas no lado oposto à pilha de toras, dentro do talhão. Após o carregamento da madeira em toras para celulose, ocorria o cavaqueamento das ponteiros para energia.

⁶ GUZZO, P. **Comunicação pessoal**. Monte Dourado, PA: Empresa Jari Celulose S.A., 2009.

⁷ Também são empregados sistemas com Harvester. Porém, nesse caso, os resíduos permanecem no campo após a colheita. Há o aproveitamento das ponteiros apenas no corte com Feller-buncher. Geralmente o Harvester é usado em áreas com maior incremento diamétrico. Mas, além do volume do plantio, há outras considerações para o emprego do Harvester como, por exemplo, em áreas onde haverá condução da regeneração em sistema de talhadia. Isso porque o emprego do Harvester causa menor impacto nas cepas do que o emprego do Feller-buncher.

2.3. O sistema de cavaqueamento avaliado

O sistema de cavaqueamento avaliado era composto por um picador florestal Bruno 196 (Quadro 2), alimentado com grua TMO AC9718 acoplada em trator florestal Valtra BH145 (Figura 1). O módulo possuía dois tratores autocarregáveis, sendo que um deles operava temporariamente como reserva, pois a empresa planejava ampliar a sua capacidade produtiva com a inclusão de um segundo picador. O baldeio das ponteiros e consequente empilhamento ao alcance do trator autocarregável era realizado por carregadora hidráulica frontal Caterpillar 938G com pneus (Figura 2). No momento da avaliação, o picador acumulava 5.699 horas de trabalho e a carregadora frontal 2.769 horas. O trator autocarregável reserva acumulava 587 horas e o outro 1.557 horas.

O picador possuía motor diesel estacionário e sua força era transmitida ao rotor através de embreagem tipo disco, acionada manualmente. O acionamento das partes móveis (calha de alimentação, rolos de alimentação, transportador de extração) era feito por motores e redutores elétricos. Inicialmente o picador possuía, na calha de alimentação do material, um sistema de correntes, o qual foi removido devido a sucessivas quebras, que provocavam danos irreversíveis às facas. No momento da avaliação, o trator autocarregável alimentava o picador com as ponteiros diretamente nos rolos de alimentação. Os cavacos eram extraídos por um sistema de correias diretamente para os veículos de transporte até a planta energética, que era realizado por caminhões Mercedes-Benz Axor 3340 com duas caçambas basculantes (Figura 2).

Quadro 2. Aspectos técnicos do picador florestal Bruno 196.

Número de facas	2
Contra-faca fixa	1
Potência do motor principal (diesel)	410 hp
Capacidade de produção	15 - 25 t/h
Altura de corte máxima para toras	300 mm
Altura de corte máxima para galhos	450 mm
Largura de corte máxima	1000 mm
Dimensões dos cavacos	20 - 40 mm
Peso aproximado do equipamento	16.700 kg
Sistema de extração dos cavacos	Correia



Figura 1. Picador florestal Bruno 196 (esquerda) e trator florestal Valtra BH145 equipado com grua TMO AC9718 (direita).



Figura 2. Carregadora hidráulica frontal Caterpillar 938G com pneus (esquerda) e caminhão Mercedes-Benz Axor 3340 com caçambas basculantes (direita).

O sistema era programado para operar 24 horas por dia, em dois turnos de trabalho. Em cada turno eram empregados três trabalhadores, sendo um operador do picador, um do autocarregável e um da carregadora. Assim, o sistema empregava nove trabalhadores diretos, pois eram escaladas duas equipes por dia, enquanto a terceira equipe folga. Segundo informações da empresa, a meta do sistema era produzir 8.000 toneladas de cavacos por mês.

2.4. Coleta de dados

Os dados foram coletados em fevereiro de 2009, empregando-se a metodologia de estudo de tempos para separar tempo produtivo de demoras operacionais. Os tempos foram obtidos a partir da cronometragem contínua com cronômetro sexagesimal. Foram amostrados cinco turnos de trabalho.

2.4.1. Eficiência operacional e produtividade do sistema

A eficiência operacional representa o percentual do tempo efetivamente trabalhado em relação ao tempo disponível para o trabalho. A produtividade do sistema, em toneladas de cavacos produzidos por hora efetivamente trabalhada, foi obtida a partir do tempo efetivo de trabalho para o carregamento completo dos caminhões e da respectiva pesagem da carga de cavacos na planta energética.

2.4.2. Estudo de tempos dos ciclos operacionais

As operações do sistema de cavaqueamento foram subdivididas em atividades parciais, ou seja, em ciclos operacionais realizados por cada máquina do sistema. Para determinar o número mínimo de observações necessárias para proporcionar um erro de amostragem máximo admissível e um nível de confiança desejado, empregou-se a metodologia de estudo de tempos proposta por Barnes (1968). O autor recomenda que inicialmente seja realizado um estudo piloto de cada ciclo operacional, com a cronometragem de 30 ciclos quando a duração do ciclo for menor que 2 minutos e de 5 ciclos nos casos em que a duração for maior que 2 minutos. A partir do estudo piloto, o número de observações necessárias é calculado pela seguinte expressão:

$$n \geq \frac{t^2 + CV^2}{E^2}$$

em que:

n = número mínimo de ciclos necessários;

t = valor tabelado, para o nível de probabilidade desejado e (n-1) graus de liberdade;

CV = coeficiente de variação, em percentagem;

E = erro admissível, em percentagem.

Considerando um erro de amostragem máximo de 5% e um nível de confiança de 95%, determinou-se, a partir do estudo piloto com o autocarregável, que deveriam ser amostrados 60 ciclos operacionais para o operador A e 75 ciclos para o operador B.

Contudo, foram realizadas 92 observações para o operador A e 95 para o operador B. Para a carregadora deveriam ser amostrados 50 ciclos operacionais e foram realizadas 55 observações, sendo que apenas um operador foi avaliado.

O ciclo operacional do autocarregável foi dividido em três elementos: a alimentação do picador, o deslocamento vazio e o carregamento. A alimentação do picador iniciava no momento em que a grua carregada com ponteiros se posicionava sobre a calha de alimentação e terminava no momento em que a grua vazia estava pronta para se deslocar para o próximo carregamento. O deslocamento vazio da grua iniciava após a alimentação e terminava no momento em que a grua estava pronta para realizar o próximo carregamento. O carregamento compreendeu a obtenção de ponteiros pela grua e o seu deslocamento carregado até a calha de alimentação, onde então se iniciava um novo ciclo.

O ciclo operacional da carregadora foi dividido em cinco elementos: carregamento, deslocamento carregado, descarregamento, deslocamento vazio e espera. O carregamento iniciava quando o operador executava o primeiro movimento da carregadora no sentido de obter os resíduos e terminava no momento em que a carregadora estava pronta para se deslocar carregada. O deslocamento carregado compreendeu qualquer deslocamento que a carregadora realizava carregada. Geralmente o deslocamento carregado iniciava após o carregamento e terminava no primeiro movimento para o descarregamento. O descarregamento iniciava quando o operador executava o primeiro movimento da carregadora no sentido de descarregar os resíduos e terminava no momento em que a carregadora estava pronta para se deslocar vazia. O deslocamento vazio compreendeu qualquer movimento que a carregadora realizava sem estar carregada. Geralmente o deslocamento vazio iniciava após o descarregamento e terminava no primeiro movimento para o carregamento. A espera compreendeu o tempo que a carregadora perdia esperando o momento oportuno para descarregar os resíduos ao alcance do autocarregável, sem interferir na operação de abastecimento do picador.

2.4.3. Consumo de combustível

O consumo de combustível de cada máquina foi determinado por meio de um medidor de combustível acoplado à bomba de abastecimento. O consumo médio de cada máquina foi calculado a partir do volume de óleo diesel abastecido em relação ao

tempo trabalhado registrado pelo horímetro da máquina. Os dados amostrados para o consumo médio de combustível correspondem à quinzena de trabalho coincidente aos dias em que o sistema foi avaliado.

2.4.4. Custos

Os custos operacionais foram estimados por meio da metodologia descrita por Miyata (1980) (Ver Anexo) a partir dos dados obtidos neste estudo. A estimativa dos custos baseou-se nos componentes descritos no Quadro 3.

Quadro 3. Componentes do custo das máquinas avaliadas.

Descrição	Picador	Autocarregáveis	Carregadora
Valor de aquisição (R\$/máquina)	560.000	340.000	300.000
Quantidade	1	2	1
Vida útil – máquina (anos)	5	8	8
Valor de revenda (% aquisição)	20	20	20
Facas (R\$/unidade)	1.200	-	-
Contra-facas (R\$/unidade)	900	-	-
Vida útil – facas e contra-facas (afiações)	30	-	-
Reparos e manutenção (% depreciação)	100	50	60
Taxa de juros anual (%)	12	12	12
Seguro (% Investimento Médio Anual)	4	4	4
Combustível (R\$/litro)	2,20	2,20	2,20
Lubrificação (% combustível)	36,8	36,8	36,8
Horas anuais programadas	8.030	8.030	8.030
Eficiência operacional (%)	51,9	51,9	54,5
Operação – salário (R\$/mês)	900	900	900
Operação – fator de encargos*	4,2	4,2	4,2

* Fator utilizado pela Empresa para calcular os custos incidentes sobre a remuneração da mão-de-obra, como encargos sociais, uniformes, equipamentos de proteção individual, transporte ao local de trabalho e administração da mão-de-obra.

Nota: R\$ 1,00 = US\$ 0,55.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Eficiência operacional e produtividade do sistema

A produtividade média do sistema foi de 17,51 toneladas por hora efetiva (he). Em função de diversas demoras operacionais, o sistema apresentou uma baixa eficiência operacional de 51,9%. Entre os motivos de demoras, destacam-se os tempos

dispendidos para conserto e manutenção (28,9%), por necessidade de aguardar o caminhão para a extração dos cavacos (24,8%) e para troca de facas do picador (24,5%) (Figura 3). As paradas para conserto e manutenção foram as mais frequentes (42,9%) (Figura 4), sendo que ocorreram em um intervalo médio de 107 min, com duração média de 15 min. Em 93,3% dos casos, essas paradas para conserto e manutenção ocorreram por problemas no picador, principalmente no sistema de arrefecimento. No restante (6,7%), essas paradas ocorreram por problema no autocarregável.

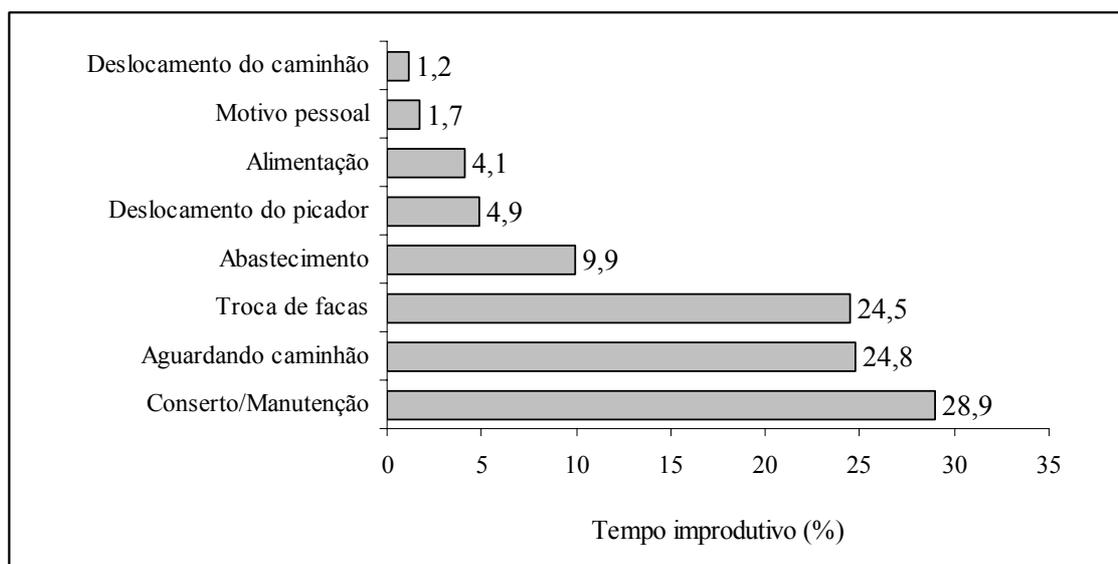


Figura 3. Distribuição do tempo improdutivo do sistema por motivo das paradas.

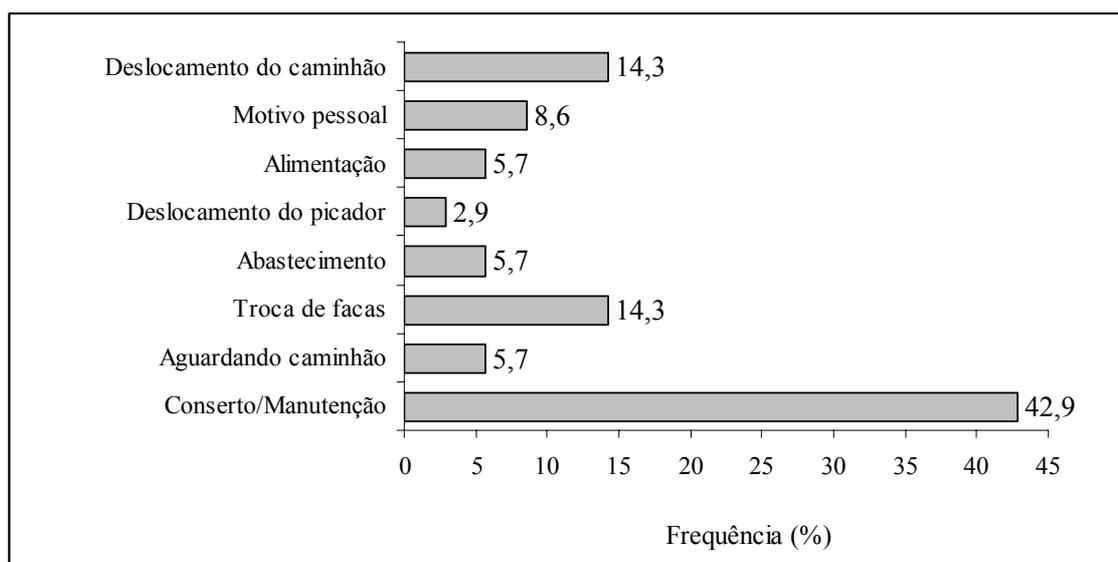


Figura 4. Distribuição do tempo improdutivo do sistema por frequência das paradas.

A troca de facas representou 24,5% do tempo improdutivo, evidenciando uma desvantagem deste tipo de picador em relação aos trituradores. Em relação ao tempo total, as trocas de facas do picador ocorreram em intervalo médio de 5,39 horas, com duração média de 38 min para cada troca. Nas condições do estudo, cada par de facas apresentou durabilidade média de afiação de 2,8 horas efetivas. Em parte, essa baixa durabilidade média de afiação pode ser atribuída ao solo arenoso do local, que provoca um maior desgaste das facas. Em relação à contra-faca, a durabilidade média de afiação, nas condições do estudo, foi de 124,5 horas efetivas.

As paradas por necessidade de aguardar caminhão referem-se à substituição de um caminhão carregado por outro vazio, pois o carregamento dos veículos de transporte com cavacos ocorria por um sistema de correias diretamente do picador. Neste sentido, observou-se que em algumas vezes houve falta de agilidade na substituição do caminhão cheio pelo vazio. Entretanto, grande parte do tempo perdido aguardando caminhão se deveu à falta de caminhão vazio disponível no local, o que impossibilitou a continuidade do trabalho. Portanto, o transporte de cavacos foi considerado ponto de estrangulamento do sistema.

As demoras por deslocamento do picador referem-se à necessidade de mudança de posição do picador na área de trabalho, em função da disponibilidade dos resíduos e da sua distância em relação ao sistema de cavaqueamento. E as demoras por deslocamento do caminhão referem-se à necessidade de mudança de posição do caminhão em relação ao sistema de extração de cavacos durante o carregamento, para que não houvesse desperdício de material.

Em um turno de 12 horas, as paradas para alimentação representaram em média apenas 15 min. Entretanto, o abastecimento das máquinas com combustível usualmente ocorria nos horários de alimentação, durante os quais os trabalhadores aproveitavam para realizar as refeições. Por isso, para a estimativa do tempo total das paradas para alimentação dos trabalhadores, deve-se incluir o tempo de abastecimento das máquinas.

3.2. Estudo de tempos dos ciclos operacionais

3.2.1. Autocarregável

A produtividade do sistema de cavaqueamento foi altamente depende do desempenho do autocarregável. Por outro lado, o tempo produtivo do autocarregável estava diretamente relacionado ao do picador, pois havia a disponibilidade de um segundo autocarregável, usado como reserva, que assegurava a continuidade do trabalho. Portanto, nestas condições, a alimentação do picador não foi considerada ponto de estrangulamento do sistema.

Apesar de haver dois autocarregáveis, o estudo de tempos dos ciclos operacionais foi realizado em apenas um deles, pois o outro permanecia como reserva. Neste estudo, dois operadores (A e B) com o mesmo tempo de experiência foram avaliados e a análise estatística dos tempos gasto por esses operadores por ciclo operacional mostrou que houve diferença significativa entre eles. O valor de F calculado (36,27) foi maior que o valor de F tabelado (6,77), indicando que houve diferença entre os operadores para o nível de 99% de probabilidade (Quadro 4). Assim, não se pode considerar que os operadores avaliados possuíam a mesma produtividade.

Quadro 4. ANOVA – Análise da variância para os operadores do autocarregável.

Fontes da variação	GL	SQ	QM	F calculado	P
Operadores	1	26630,01	26630,01	36,27	0,0000
Erro	185	135838,67	734,2631		
Total	186	162468,68			

Nas condições do estudo, o tempo médio por ciclo operacional gasto pelo operador A foi de 41,1 segundos enquanto que o tempo gasto pelo operador B foi de 65,0 segundos (Quadro 5). O operador A, além de ter apresentado menor tempo médio no ciclo operacional, apresentou melhor desempenho nos elementos carregamento e alimentação do picador quando comparado com o operador B (Figura 5). O operador B apresentou no seu ciclo operacional o elemento de espera, que compreendeu o tempo parado da grua à espera do abastecimento da pilha de ponteiros pela carregadora, enquanto que o operador A não realizou a espera em nenhum dos ciclos amostrados. Por isso, observou-se que haveria a possibilidade de otimizar o ciclo operacional do operador B através da melhor organização do trabalho, no sentido de melhorar o seu desempenho operacional e aumentar a produtividade do picador.

Quadro 5. Estatística descritiva dos ciclos operacionais do autocarregável.

Operador	A	B
Tempo médio por ciclo operacional (s)	41,1	65,0
Desvio Padrão	13,94	35,45
Variância	194,46	1256,84
Observações	92	95

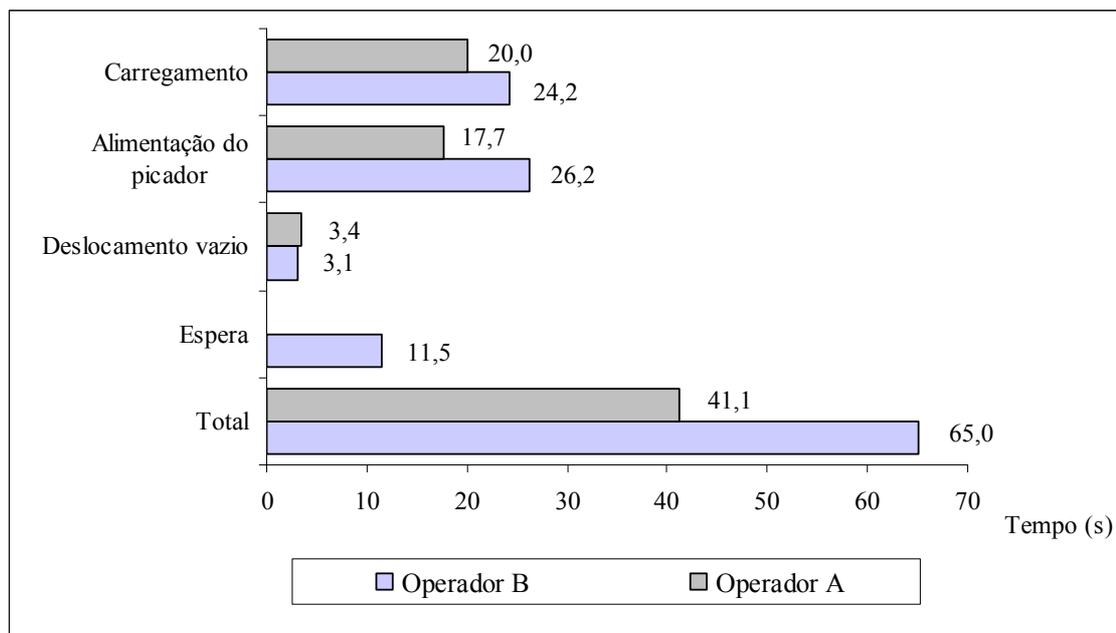


Figura 5. Ciclos operacionais do autocarregável.

3.2.2. Carregadora

A função da carregadora era realizar o baldeio e o empilhamento das ponteiros próximo ao autocarregável, de forma a garantir a disponibilidade de material ao alcance da grua para a alimentação do picador. Apesar de ter realizado baldeio durante parte das demoras operacionais do picador, o tempo produtivo da carregadora foi influenciado pela baixa eficiência operacional do mesmo. A eficiência operacional da carregadora foi de apenas 54,5%.

O tempo médio do ciclo operacional da carregadora foi de 3,23 minutos. O deslocamento vazio foi o elemento que compreendeu o maior tempo do ciclo (36%) em função da carregadora ter realizado baldeio e empilhamento das ponteiros mais distantes durante as demoras operacionais do picador. O carregamento apresentou maior tempo relativo (19%) do que o descarregamento (17,9%). Isso porque a atividade de carregamento requer maior habilidade do que a de descarregamento. Além disso, o

descarregamento próximo ao autocarregável deve ser rápido, de forma a não interferir na atividade de alimentação. Em relação a isto, observou-se que o tempo de espera representou um alto percentual do ciclo operacional da carregadora (16,4%) (Figura 6).

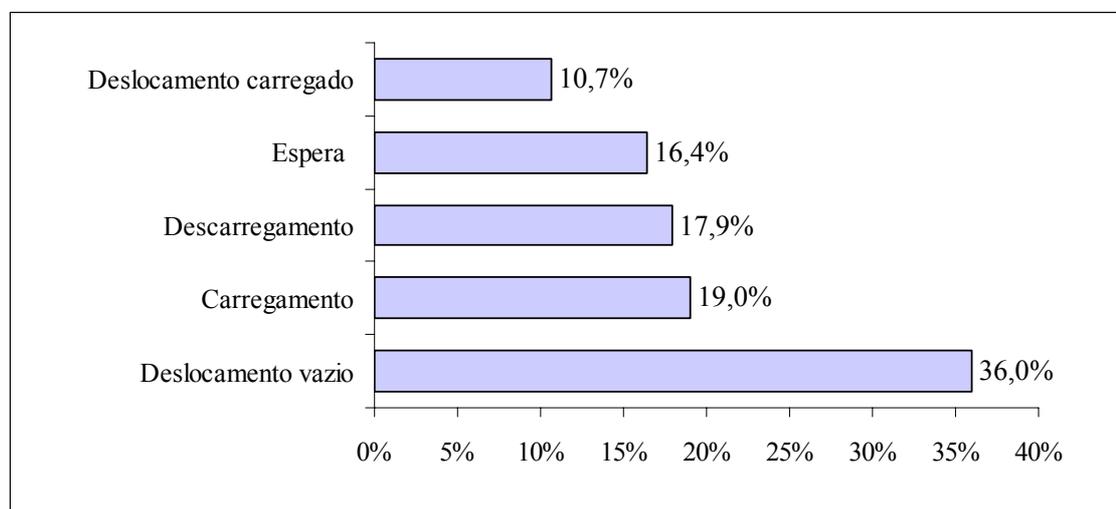


Figura 6. Elementos do ciclo operacional da carregadora.

3.3. Consumo de combustível e balanço energético

O consumo médio de combustível do sistema de cavaqueamento foi de 50,5 litros por hora (Quadro 6), o que representa um consumo de 2,35 litros de combustível por tonelada de cavacos produzida. O aporte energético do combustível⁸ consumido pelo sistema de cavaqueamento foi de 20.191 kcal por tonelada produzida. Como o poder calorífico contido na biomassa varia de acordo com o conteúdo de umidade, a razão entre a energia produzida e a energia consumida pelo sistema varia de 94 (45% de umidade) a 162 (15% de umidade). Ou seja, o sistema produziu entre 94 e 162 vezes mais energia do que consumiu (Quadro 7).

Quadro 6. Consumo de combustível.

Máquina	Consumo horário (L/h)
Picador	22,70
Autocarregável	16,85
Carregadora	10,95
Total – Sistema	50,50

⁸ Considerando que o poder calorífico inferior do diesel é de 8.600 kcal/litro.

Quadro 7. Poder calorífico para diferentes conteúdos de umidade.

	Umidade (%)			
	15	25	35	45
PCS (kcal/kg) ¹	3.954,5	3.954,5	3.954,5	3.954,5
PCI (kcal/kg) ²	3.271,3	2.815,9	2.360,4	1.905,0
Balanco energético	162	139	117	94

PCS = poder calorífico superior. PCI = poder calorífico inferior.

¹ Valor médio obtido em um estudo que determinou o poder calorífico superior dos resíduos resultantes da colheita de *Eucalyptus grandis* e obteve valores médios de 3.908 kcal/kg para os resíduos com diâmetro entre 1 e 3 cm e 4.001 kcal/kg para os resíduos com diâmetro inferior a 1 cm (BAUER, 2001).

² Considerou-se que a perda de energia é de 600 kcal/kg de água.

Observa-se que quanto menor o conteúdo de umidade da biomassa, maior a razão entre a energia produzida e a energia consumida. Por isso, deixar os resíduos no campo por certo período de tempo após a colheita, para redução da umidade, constitui uma prática econômica e, também, ambiental, pela perda parcial das folhas para a ciclagem de nutrientes no solo.

3.4. Custos

O sistema de cavaqueamento avaliado apresentou o custo de R\$ 376,56 por hora efetiva de trabalho, o que representa um custo de R\$ 21,51 por tonelada de cavacos produzida. O custo por unidade energética foi de R\$ 2,70 por Giga Joule (Quadro 8), podendo ser ainda menor, dependendo do conteúdo de umidade da biomassa.

Quadro 8. Produtividade e custos do sistema avaliado.

Máquina	Custo operacional (R\$/he)	Produtividade (t/he)	Custo de produção (R\$/t)	Custo por unidade energética (R\$/GJ*)
Picador	179,88	-	-	-
Autocarregáveis	118,63	-	-	-
Carregadora	78,05	-	-	-
Total – Sistema	376,56	17,51	21,51	2,70

he = hora efetiva. GJ (Giga Joule) = 238.845,9 kcal.

* Considerando o PCI de 1.905 kcal/kg (45% de umidade) (Quadro 7).

O custo de cavaqueamento da biomassa em unidades monetárias por unidade energética é atrativo em comparação com outros produtos energéticos (Quadro 9). Porém, deve-se considerar que o rendimento energético das tecnologias de conversão varia de acordo com o combustível. A energia elétrica e os combustíveis fósseis são

mais eficientes do que a biomassa florestal. Além disso, deve-se considerar o custo de transporte dos cavacos, que diminui a atratividade do energético com o aumento da distância. Conforme dados fornecidos pela empresa, o preço do frete gira em torno de R\$ 0,88 por tonelada transportada por quilômetro. Isso corresponde a R\$ 0,11 por Giga Joule por quilômetro. Assim, quanto maior a distância de transporte, menor a atratividade da biomassa florestal.

De acordo com Kirby et al. (2003), o recurso de biomassa deve estar disponível de maneira sustentável e a planta de produção de energia deve estar localizada em um raio de alcance de 80 km no máximo.

Quadro 9. Comparativo de preços de produtos energéticos.

Produto energético	Unidade	R\$/Unid	GJ/Unid*	R\$/GJ
Energia elétrica (concessionárias)	MWh	260,09 ¹	3,6	72,25
Gás liquefeito de petróleo – GLP	kg	2,59 ²	46 x 10 ⁻³	56,30
Gás natural	m ³	2,399 ³	35 x 10 ⁻³	68,54
Óleo diesel	L	2,173 ⁴	36 x 10 ⁻³	60,36
Álcool	L	2,062 ⁴	23 x 10 ⁻³	89,65
Óleo combustível 1A	kg	0,588 ⁵	41 x 10 ⁻³	14,34
Óleo combustível 1B	kg	0,624 ⁵	42 x 10 ⁻³	14,86
Cavacos, serragem e resíduos	t	140,00 ⁶	11,7	11,96

* Poder calorífico inferior adotado.

¹ Preço praticado em jan/09 na Região Norte para a classe de consumo industrial. Preço final ao consumidor. Inclui tributos federais e estaduais. Fonte: ANEEL (2009).

² Preço proporcional referente ao botijão de 13 kg praticado em abr/09 no Estado do Pará. Preço final ao consumidor. Inclui tributos federais e estaduais. Fonte: ANP (2009).

³ Preço médio praticado em abr/09 na Região Norte. Preço final ao consumidor. Inclui tributos federais e estaduais. Fonte: ANP (2009).

⁴ Preço médio praticado em abr/09 no Estado do Pará. Preço final ao consumidor. Inclui tributos federais e estaduais. Fonte: ANP (2009).

⁵ Preço médio de produtores praticado em jan/09 na Região Norte. Não inclui ICMS. Fonte: ANP (2009).

⁶ Preço médio praticado em out/2009 no Brasil. Fonte: REMADE (2009).

4. CONCLUSÕES

O sistema apresentou uma baixa eficiência operacional (51,9%), principalmente devido a perdas de tempo para conserto e manutenção. Por isso, não tem atingido a meta de produção mensal.

A produtividade média do sistema (17,51 t/he), apesar de estar dentro da faixa de capacidade de produção especificada pelo fabricante do picador (15 - 25 t/he), pode

ser aumentada, principalmente por meio da redução do tempo perdido para conserto e manutenção e aguardando caminhão.

A alimentação do picador, que vem sendo realizada diretamente nos rolos de alimentação, demanda maior agilidade do operador da grua do autocarregável e resulta em maior perda de tempo.

O carregamento dos caminhões com cavacos diretamente provenientes do picador foi considerado ponto de estrangulamento do sistema, devido a ocorrências de falta de caminhão disponível no local, que resultaram em paradas do picador.

O sistema de cavaqueamento apresentou balanço energético positivo, ou seja, produziu mais energia do que consumiu. Mesmo considerando o transporte dos cavacos à uma distância razoável, ainda espera-se um balanço positivo.

Considerando que as ponteiras de eucalipto possuem custo zero, pelo seu caráter residual, o custo de coleta e cavaqueamento torna esses resíduos competitivos com outros produtos energéticos. Porém, a atratividade energética dos cavacos diminui com o aumento da distância de transporte.

AGRADECIMENTOS

Ao Engenheiro Florestal Pablo Guzzo, Gerente de Colheita Forestal da Jari Celulose S.A., por viabilizar este trabalho. Ao Sr. Edmilson, funcionário da Empresa Vix Logística S.A., pelo apoio logístico na coleta de dados. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Tarifas médias por classe de consumo e região**. Disponível em: <http://rad.aneel.gov.br/reportserverSAD?%2fSAD_REPORTS%2fSAMP_TarifaMedCConsumoRegiao&rs:Command=Render>. Acesso em: 25 abr. 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. **Levantamento de Preços**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Mensal_Index.asp>. Acesso em: 25 abr. 2009.

BARNES, R.M. **Motion and time study**: design and measurement of work. 6. ed. New York: John Willey & Sons, 1968. 799p.

BAUER, S.R.T. **Resíduos da exploração florestal de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden para geração de energia elétrica**. Botucatu, SP: UNESP, 2001. 54 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CORRÊA, J.J.L.; JACOMINE, P.K.T.; SANTOS, R.D. **Solos do Jari**: Levantamento de Reconhecimento de Média Intensidade dos Solos sob Floresta Cultivada na Área da Companhia Florestal Monte Dourado no Jari. Rio de Janeiro: Companhia Florestal Monte Dourado, 1989. 128 p.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATION – FAO. **Energy conservation in the mechanical forest industries**. Roma: FAO, 1990. 130 p. (FAO Forestry Paper, n. 93).

KIRBY, M.; DAHLE, D.; HEIMILLER, D.; OWENS, B. **Assessing the potential for renewable energy on public lands**. United States: U.S. Department of the Interior and U.S. Department of Energy, 2003. 95 p. DOE/GO-102003-1704.

LOPES, E.S.; PIEPER, M.; KURACHI, E.A.R.; CRUZIANINI, E. Análise técnica de um sistema de picagem de resíduos na colheita florestal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 7, 2005, Vitória, ES. **Anais...** Viçosa: SIF, UFV, DEF, 2005. p. 259-266.

MARTÍ, B.V. Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. **Revista Ecosistemas**, n. 1, 2006. Disponível em: <<http://www.revistaecosistemas.net/pdfs/402.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2007.

MIYATA, E.S. 1980. **Determining fixed and operating costs of logging equipment**. St. Paul, MN: USDA Forest Service, 1980. 16 p. (Gen. Tech. Report NC-55).

REMADE. **Preços de Madeira no Brasil**. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/br/indicadores.php?num=13&pais=Brasil&title=Preços de Madeira>>. Acesso em: 10 dez. 2009.

SALMERON, A. Pesquisa sobre mecanização florestal para abastecimento industrial de resíduo visando a produção de energia. **Série Técnica IPEF**, v. 1, n. 2, 1980. 10 p.

AValiação DE DOIS SISTEMAS DE COLHEITA E ENFARDAMENTO DE BIOMASSA FLORESTAL

RESUMO – O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho e estimar os custos de dois sistemas de colheita e enfardamento de biomassa florestal para aproveitamento energético. Um sistema foi composto por um protótipo de uma colhedora-picadora-enfardadora (Bio-baler), e o outro sistema requereu duas operações sucessivas. A primeira operação consistiu no corte e na picagem da biomassa, sendo avaliados dois modelos de tratores florestais Supertrak equipados com implemento de corte Fecon. A segunda operação consistiu no enfardamento da biomassa realizado por uma enfardadora agrícola Class. As máquinas foram avaliadas em três diferentes áreas localizadas em *Osceola National Forest*, Estado da Florida, Estados Unidos. A coleta de dados baseou-se em estudo de tempos, determinação do consumo de combustível e medição dos fardos de biomassa produzidos. Uma amostra do material dos fardos foi coletada para determinação do poder calorífico e do conteúdo de umidade. Na área considerada mais representativa da vegetação local (Site 2), a Bio-baler enfardou 8,05 t/ha, enquanto que o sistema Supertrak-Claas enfardou 9,75 t/ha (43 e 52% da biomassa disponível na área, respectivamente). A capacidade de área foi de 0,30 ha/h para a Bio-baler e 0,51 ha/h para a Claas. A densidade dos fardos foi de 321 kg/m³ para os produzidos pela Bio-baler e de 373 kg/m³ para os produzidos pela Claas. O poder calorífico superior médio do material dos fardos foi de 4.878 kcal/kg, com conteúdo de umidade de 38% (base úmida). O custo por área foi menor para a Bio-baler (US\$320,91/ha) do que para o sistema Supertrak-Claas (US\$366,62/ha).

Palavras-chave: enfardamento, redução de material combustível, energia renovável.

EVALUATION OF TWO ROUND BALING SYSTEMS FOR HARVESTING FOREST BIOMASS

ABSTRACT – The objective of this study was to evaluate the performance and to estimate costs of two round baling systems for harvesting forest biomass for energy.

One system was a cutter-shredder-baler prototype (Bio-baler). The other system required two successive operations. The first operation was cutting and shredding, with a Supertrak tractor equipped with a Fecon mulcher head. Two different models of Supertrak mulcher were evaluated. The second operation was baling with a Claas baler. The machines were evaluated in three different areas on the Osceola National Forest in Florida, United States. Data collection was based on time study, fuel consumption and bale measurements. Material was collected from a sample of bales for heat and moisture content determination. On the most representative site (Site 2), the Bio-baler recovered 8.05 green t/ha while the mulcher and the Claas baler recovered 9.75 green t/ha (43 and 52% of available biomass, respectively). The area capacity was 0.30 ha/h for the Bio-baler and 0.51 ha/h for the Claas baler. Density of the bales was 321 green kg/m³ for the Bio-baler and 373 green kg/m³ for the Claas baler. Average net heat content was 4878 kcal/kg, with biomass containing 38% of moisture content on a wet basis. Cost per unit area was lower with the Bio-baler (US\$320.91/ha) than with the mulcher-baler system (US\$366.62/ha).

Key-words: baling, fire fuel reduction, renewable energy.

1. INTRODUÇÃO

A colheita de biomassa florestal para aproveitamento energético tipicamente tem empregado cavaqueadores em conjunto com sistemas convencionais de colheita de madeira. Porém, em áreas com apenas resíduos, arbustos ou espécies arbóreas de pequeno diâmetro, esses sistemas convencionais não são adequados.

O alto custo desses sistemas convencionais nos Estados Unidos, compostos por Feller-bunchers, Skidders e cavaqueadores móveis, tem estimulado a busca por alternativas mais eficientes para a colheita de resíduos e árvores de pequeno diâmetro para aproveitamento energético. A colheita deste tipo de biomassa ainda tem sido um desafio em termos de mecanização (WINDELL e BRADSHAW, 2000).

Além disso, a eliminação do sub-bosque florestal, composto basicamente por espécies arbustivas, gramíneas e por regeneração arbórea, muitas vezes é necessária no manejo silvicultural. Em certas condições, o acúmulo de biomassa no sub-bosque pode colocar a floresta em situação de risco de incêndios e proliferação de pragas, que comprometem sua sanidade e produtividade, podendo causar, inclusive, alto índice de mortalidade entre as árvores e perda de habitat para a fauna (RUMMER, 2007).

Nos Estados Unidos, o fogo tem sido empregado, através da queima controlada, como técnica de redução de material combustível e restauração de ecossistemas florestais. Entretanto, em áreas com acúmulo de biomassa há o risco do fogo fugir do

controle e resultar em incêndios catastróficos. O controle da fumaça também é um fator limitante no emprego da queima controlada, especialmente quando há comunidades ou rodovias adjacentes (RUMMER, 2007).

Quando há a possibilidade do fogo fugir do controle, resultando em grandes prejuízos econômicos, o tratamento mecânico se faz necessário. Há diversas máquinas disponíveis comercialmente para o tratamento mecânico de sub-bosque florestal, sendo algumas desenvolvidas especificamente para esta finalidade (WINDELL e BRADSHAW, 2000). Contudo, estas máquinas não realizam a recuperação da biomassa visando o aproveitamento econômico.

O enfardamento tem sido amplamente utilizado na agricultura desde a década de 1970 e permite o aumento da densidade do material, uma vez que compacta a biomassa em fardos. Isso facilita o manuseio, o estoque e o transporte da biomassa. Contudo, poucos estudos foram realizados envolvendo o enfardamento de biomassa florestal.

Inicialmente o enfardamento foi analisado em termos de resultado do produto e conceito do equipamento. Neste estudo, a enfardadora foi alimentada manualmente e os autores concluíram que o enfardamento era uma alternativa tecnicamente viável para biomassa florestal picada (FRIDLEY e BURKHARDT, 1984). Posteriormente, avaliou-se o uso da enfardadora agrícola Claas Rollant 62 em florestas de pequeno diâmetro (DAP entre 2,5 e 7,5 cm). Essa enfardadora mostrou potencial na coleta e no enfardamento de material lenhoso com até 5 cm de diâmetro, previamente picado e seco no campo (STOKES et al., 1987). O enfardamento de biomassa florestal mostrou-se satisfatório em um teste com enfardadoras comerciais New Holland, mas a alimentação foi feita diretamente, não sendo testado o desempenho de coleta de biomassa no campo (FELKER et al., 1999). Recentemente, um protótipo de uma colhedora-picadora-enfardadora, desenvolvido a partir de uma enfardadora comercial New Holland, foi avaliado em cinco diferentes plantios de *Salix sp* e mostrou-se viável tecnicamente (SAVOIE et al., 2006; LAVOIE et al., 2007).

Diante de pouca informação sobre o enfardamento de biomassa florestal, este estudo objetivou avaliar o desempenho e estimar os custos de dois sistemas de colheita e enfardamento, bem como determinar o balanço energético dos sistemas avaliados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Áreas do estudo

Os sistemas foram avaliados em três diferentes áreas em *Osceola National Forest*, localizada próxima ao município de Lake City, Estado da Flórida, no sul dos Estados Unidos. As florestas desta região são predominantemente formadas por *Pinus palustris* (“longleaf pine”) e *Pinus elliottii* (“slash pine”). No sub-bosque predominam as espécies *Serenoa repens* (“palmetto”) e *Ilex glabra* (“gall berry”), associadas com diferentes espécies de gramíneas e arbustos e regeneração arbórea. Previamente à avaliação das máquinas, foi realizado um inventário para determinação das espécies e da quantidade de biomassa disponível por unidade de área (Quadro 1).

Quadro 1. Quantidade de biomassa disponível, em toneladas por hectare.

Site	DAP < 2,5 cm		2,5 ≤ DAP ≤ 14 cm		Total
	Pinus	Outras espécies ¹	Pinus	Outras espécies ²	
1	0,00	16,23	0,31	0,00	16,54
2	0,00	16,63	1,75	0,27	18,65
3 – Bloco 1	9,03	12,69	64,83	0,67	87,22
3 – Bloco 2	4,64	23,07	22,37	1,37	51,45

DAP = diâmetro a altura do peito (1,3 m).

¹ Inclui *Serenoa repens*, *Ilex glabra*, *Myrica cerifera* e *Persea borbonia*.

² Inclui *Acer sp* e *Myrica cerifera*.

O Site 1 continha 43,2 árvores/ha (com DAP > 14 cm) e área basal de 2,79 m²/ha. No sub-bosque havia 16,54 t/ha de biomassa disponível, com cerca de 98% do total composto por *Serenoa repens* (“palmetto”), *Ilex glabra* (“gall berry”), *Myrica cerifera* (“wax myrtle”) e *Persea borbonia* (“red bay”) com DAP até 2,5 cm. O restante era regeneração de *Pinus spp* com DAP entre 2,5 e 14 cm (Figura 1).

O Site 2 foi considerado o mais representativo das condições encontradas em grande parte das florestas no sul dos Estados Unidos. A floresta continha 205,1 árvores/ha (com DAP > 14 cm) e área basal de 13,57 m²/ha. A quantidade de biomassa no sub-bosque foi de 18,65 t/ha, sendo 89% composto por *Serenoa repens*, *Ilex glabra* e *Myrica cerifera* com DAP até 2,5 cm. O restante consistiu em regeneração de *Pinus spp* com DAP entre 2,5 e 14 cm e uma pequena quantidade de *Acer sp* e *Myrica cerifera* com DAP maior do que 2,5 cm (Figura 1).



Figura 1. Site 1 (esquerda) e Site 2 (direita).

O Site 3 continha uma baixa densidade de 24 árvores porta-sementes por hectare e uma densa regeneração de *Pinus* spp. Essa área foi dividida em dois blocos. No Bloco 1 havia 87,22 t/ha de biomassa, sendo 74% regeneração de *Pinus* spp com DAP entre 2,5 e 14,0 cm. Cerca de 15% das plantas eram *Serenoa repens*, *Ilex glabra* e *Myrica cerifera* com DAP até 2,5 cm. No Bloco 2 havia 51,45 t/ha de biomassa, sendo 43% regeneração de *Pinus* spp com DAP entre 2,5 e 14 cm e 45% *Serenoa repens* e *Ilex glabra* com DAP até 2,5 cm. Os 12% restante eram regeneração de *Pinus* spp com DAP inferior a 2,5 cm, e uma pequena quantidade de *Myrica cerifera* com DAP superior a 2,5 cm (Figura 2).



Figura 2. Site 3 – Bloco 1 (esquerda) e Site 3 – Bloco 2 (direita).

2.2. Sistemas avaliados

O primeiro sistema avaliado consistiu em um protótipo de uma colhedora-picadora-enfardadora (Bio-baler), desenvolvido pela *Université Laval* de Quebec no Canadá. Em uma única operação, a Bio-baler corta, pica e enfarda a biomassa. Esse

protótipo, originalmente desenvolvido para colher plantios de *Salix sp*, inclui uma enfardadora comercial (New Holland BR740) como plataforma de corte. A cabeça de corte original continha quatro lâminas de corte e um picador com 12 martelos, conforme descrito por Savoie et al. (2006) e Lavoie et al (2007). Contudo, a nova cabeça de corte utilizada neste estudo foi desenvolvida para cortar arbustos, sendo composta por um picador com 20 martelos e 2,30 metros de largura, combinando as funções de corte e picagem (sem lâminas de corte) (LAVOIE et al., 2008). Para movimentação e fonte de potência da Bio-baler, utilizou-se um trator Caterpillar Challenger MT565B, com 145 hp na TDP (Figura 3).



Figura 3. Bio-baler operada por trator Caterpillar Challenger MT565B.

O segundo sistema avaliado requereu duas operações sucessivas. A primeira operação consistiu no corte e na picagem da biomassa, realizados por um trator florestal Supertrak com implemento de corte Fecon. Dois modelos diferentes foram avaliados: o SK 140 TR, com 140 hp, com implemento de corte BH-74 SS, com 1,52 m de largura e 30 dentes, e o SK 300 TR, com 300 hp, com implemento de corte BH-120, com 2,16 m de largura e 48 dentes (Figura 4). A segunda operação consistiu na coleta e no enfardamento da biomassa, realizados por uma enfardadora Claas Rollant 250, com largura de trabalho de 1,85 m. Para movimentação e fonte de potência da enfardadora, utilizou-se um trator Caterpillar Challenger MT545B, com 120 hp na TDP (Figura 5).



Figura 4. Tratores Supertrak, SK 140 e SK 300, equipados com implemento Fecon.

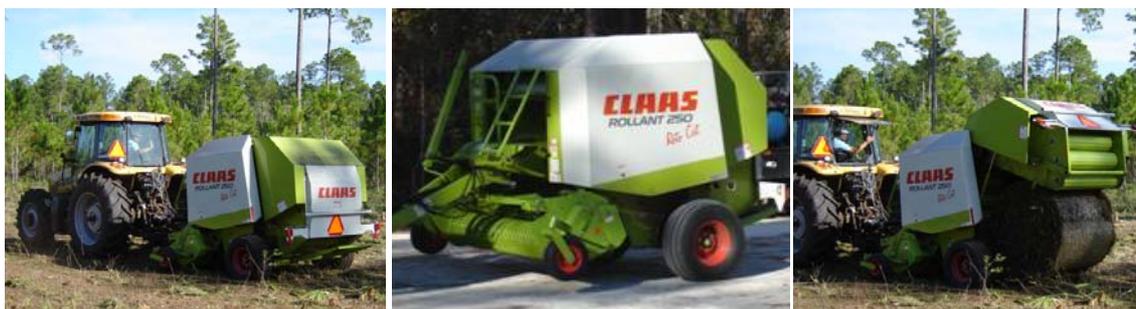


Figura 5. Claas Rollant 240 operada por trator Caterpillar Challenger MT545B.

2.3. Coleta de dados

2.3.1. Desempenhos

Na avaliação dos desempenhos individuais das máquinas foi realizado um estudo de tempos para separar tempo produtivo de demoras operacionais. As máquinas foram cronometradas realizando atividades produtivas em áreas delimitadas lado a lado e os dados foram coletados com aparelhos registradores de atividade (*Yellow Activity Recording System*). As distâncias percorridas foram obtidas por meio de uma roda medidora de distância (*Distance Measuring Wheel*) e as áreas foram medidas com GPS Garmin (Figura 6).

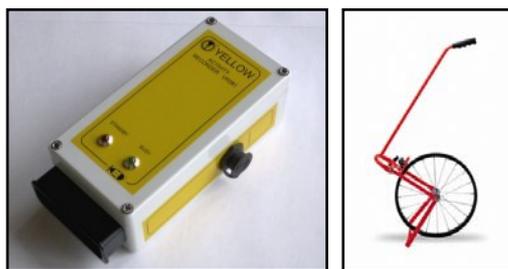


Figura 6. Aparelho registrador de atividade (*Yellow Activity Recording System*) (esquerda) e roda medidora de distância (*Distance Measuring Wheel*) (direita).

2.3.2. Fardos

Os fardos foram medidos no campo, em termos de tamanho e peso. As dimensões foram obtidas por meio de uma fita graduada e os volumes foram calculados a partir das dimensões obtidas, por meio da seguinte equação:

$$V = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot d_2}{4} \cdot c$$

Onde:

d_1 = diâmetro horizontal da elipse formada pelo fardo (m);

d_2 = diâmetro vertical da elipse formada pelo fardo (m);

c = comprimento do fardo (m).

No Site 1 foram pesados oito fardos da Bio-baler e seis fardos da Claas, no Site 2 foram pesados oito fardos da Bio-baler e 12 fardos da Claas e no Site 3 foram pesados quatro fardos, sendo todos provenientes da Claas (Figura 7).



Figura 7. Pesagem dos fardos.

Uma amostra do material foi coletada para análise laboratorial do conteúdo de umidade e do poder calorífico. No Site 1 foram amostrados dois fardos da Bio-baler e quatro fardos da Claas, no Site 2 foram amostrados cinco fardos de cada uma das enfardadoras e no Site 3 foram amostrados quatro fardos, sendo todos provenientes da Claas.

2.3.3. Consumo de combustível

O consumo de combustível para cada máquina foi determinado por meio de um medidor de combustível acoplado à bomba de abastecimento. A capacidade do tanque de combustível era de 189 litros para o trator SK 140, 246 litros para o trator SK 300, 378 litros para o trator MT565B e 269 litros para o trator MT545B.

2.3.4. Custos

Os custos operacionais foram estimados por meio da metodologia descrita por Miyata (1980) (Ver Anexo) a partir do consumo de combustível e da produtividade determinados neste estudo. A estimativa de custos baseou-se nos componentes descritos nos Quadros 2 e 3.

Quadro 2. Componentes do custo dos tratores.

Descrição	SK 140	SK 300	MT545B	MT565B
Valor de aquisição (US\$)	140.000	300.000	86.000	105.000
Implemento de corte Fecon (US\$)	25.000	50.000	-	-
Dentes de corte (US\$/dente)	22	70	-	-
Quantidade de dentes de corte	30	48	-	-
Vida útil dos dentes de corte (horas)	200	400	-	-
Vida útil da máquina (anos)	5	5	5	5
Valor de revenda (% aquisição)	20	20	20	20
Reparos e manutenção (% depreciação)	100	100	100	100
Taxa de juros anual (%)	10	10	10	10
Seguro (% Investimento Médio Anual)	3,5	3,5	3,5	3,5
Combustível (US\$/L)	0,86	0,86	0,86	0,86
Lubrificação (% combustível)	36,8	36,8	36,8	36,8
Horas anuais programadas (hp)	2.000	2.000	2.000	2.000
Taxa de utilização (%)	70	70	70	70
Operação – salário (US\$/hp)	12,00	12,00	12,00	12,00
Operação – benefícios (%)	30	30	30	30

Quadro 3. Componentes do custo das enfardadoras.

Descrição	Bio-baler	Claas
Valor de aquisição (US\$)	60.000	25.000
Rolo de malha plástica c/ 3.048 m (US\$/rolo)	250	250
No. de voltas de malha plástica por fardo	2	2
Vida útil da máquina (anos)	4	4
Valor de revenda (% aquisição)	25	25
Reparos e manutenção (% depreciação)	150	150
Taxa de juros anual (%)	10	10
Seguro (% Investimento Médio Anual)	2	2
Horas anuais programadas (hp)	2.000	2.000
Taxa de utilização (%)	70	70

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Desempenho dos sistemas avaliados

3.1.1. Site 1

A Bio-baler produziu quatro fardos de uma área de 0,42 ha em 1,02 h, enquanto que a Claas produziu seis fardos de 0,45 ha em 0,62 h no Site 1 (Quadro 4). O tempo operacional médio por fardo foi de 15,3 min para a Bio-baler (3,92 fardos/h) e 6,2 min para a Claas (9,68 fardos/h) (Quadro 5). A Bio-baler requereu mais tempo para produzir um fardo, pois, além de enfardar, a máquina corta e pica a biomassa. Como a Claas apenas enfarda, o trator SK 140 desempenhou as funções de corte e picagem, com produtividade estimada em 0,3 ha/h. O trator SK 300 não foi avaliado neste site, tendo em vista que a área continha a menor quantidade de biomassa e o objetivo principal foi avaliar o desempenho das enfardadoras antes de introduzi-las em condições mais desafiadoras.

Quadro 4. Dados operacionais no Site 1.

Máquina	Área (ha)	Tempo (h)	Combustível (L)	Distância/fardo (m)	Fardos	
					No.	Peso (kg)
SK 140	0,45	1,48	21,77	-	-	-
Bio-baler e MT565B	0,42	1,02	13,97	580,3	4	513,0
Claas e MT545B	0,45	0,62	9,27	312,4	6	627,4

Quadro 5. Desempenho das máquinas avaliadas e produtividade no Site 1.

	Bio-baler e MT565B	Claas e MT545B
Tempo por fardo (min)	15,30	6,20
Fardos por hora	3,92	9,68
Capacidade de área (ha/h)	0,42	0,72
Toneladas por hora produtiva	2,01	6,07
Toneladas por hectare	4,83	8,46
Percentual de sub-bosque enfardado	29	51

A capacidade de área foi de 0,42 ha/h para a Bio-baler e 0,72 ha/h para a Claas. Observou-se que a Claas pôde trafegar com mais facilidade e com maior velocidade pelo sub-bosque, pois o material já estava picado pelo trator SK 140. Por outro lado, a Bio-baler precisou trafegar pelo sub-bosque despreparado. Além disso, a maior largura de corte (2,3 m) da Bio-baler resultou em maior sobreposição de áreas.

Apesar da Bio-baler ter percorrido quase o dobro (580 m) da distância média por fardo percorrida pela Claas (312 m), a média de peso dos seus fardos foi menor (513 kg) do que os fardos produzidos pela Claas (627 kg). Como resultado, a quantidade de biomassa enfardada pela Claas (8,46 t/ha) foi maior do que a enfardada pela Bio-baler (4,83 t/ha). O percentual de sub-bosque enfardado foi de 29% para a Bio-baler e 51% para a Claas. Entretanto, deixar uma maior quantidade de biomassa no solo pode ser vantajoso em termos de ciclagem de nutrientes.

O consumo médio de combustível foi estimado em 33,26 L/ha (6,81 L/t ou 3,49 L/fardo) para o sistema da Bio-baler e 68,98 L/ha (8,25 L/t ou 5,17 L/fardo) para o sistema SK 140-Claas.

3.1.2. Site 2

A Bio-baler produziu 14 fardos de uma área de 0,93 ha em 3,15 h, enquanto que a Claas produziu 28 fardos de 1,64 ha em 3,19 h no Site 2 (Quadro 6). A Bio-baler apresentou melhor desempenho no Site 2 (4,44 fardos/h) no que no Site 1 (3,92 fardos/h) devido a maior quantidade de biomassa por área. Por outro lado, a Claas teve algumas demoras operacionais que resultaram em menor produtividade no Site 2 (8,78 fardos/h) do que no Site 1 (9,68 fardos/hora) (Quadro 7).

Quadro 6. Dados operacionais no Site 2.

Máquina	Área (ha)	Tempo (h)	Combustível (L)	Distância/fardo (m)	Fardos	
					No.	Peso (kg)
SK 140	1,24	2,84	41,79	-	-	-
SK 300	0,40	1,10	22,45	-	-	-
Bio-baler e MT565B	0,93	3,15	43,19	406,3	14	535,4
Claas e MT545B	1,64	3,19	47,51	224,9	28	570,9

Quadro 7. Desempenho das máquinas avaliadas e produtividade no Site 2.

	Bio-baler e MT565B	Claas e MT545B
Tempo por fardo (min)	13,50	6,84
Fardos por hora	4,44	8,78
Capacidade de área (ha/h)	0,30	0,51
Toneladas por hora produtiva	2,31	5,01
Toneladas por hectare	8,05	9,75
Percentual de sub-bosque enfardado	43	52

Como resultado da maior quantidade de biomassa por área, ambas enfardadoras apresentaram menor capacidade de área no Site 2. Os valores foram 0,30 ha/h para a Bio-baler e 0,51 ha/h para a Claas. O percentual de sub-bosque enfardado foi de 43% (8,05 t/ha) para a Bio-baler e 52% (9,75 t/ha) para a Claas.

A produtividade do trator SK 140 foi de 0,44 ha/h e a do trator SK 300 foi de 0,36 ha/h, com o SK 140 sendo mais produtivo possivelmente pela sua maior mobilidade entre as árvores e outros obstáculos na floresta.

O consumo médio de combustível foi estimado em 46,44 L/ha (5,76 L/t ou 3,09 L/fardo) para o sistema da Bio-baler. Para o sistema da Claas, o consumo foi de 62,67 L/ha (6,43 L/t ou 3,67 L/fardo) com o emprego do SK 140 e 85,09 L/ha (8,73 L/t ou 4,98 L/fardo) com o emprego do SK 300.

3.1.3. Site 3

No Bloco 2 do Site 3, a Claas produziu um fardo em 25,8 min de uma área de 650 m² tratada com uma passada do SK 140 e um fardo em 11,4 min de uma área de 610 m² tratada com duas passadas do SK 140 (Quadro 8). Essa diferença no tempo se deve ao fato da biomassa ter sido picada mais fina na área com duas passadas. A Bio-baler não foi avaliada no Site 3 devido as condições da floresta, consideradas extremas em termos de sub-bosque.

Como esperado, a Claas percorreu menor distância (287 m) e produziu um fardo mais pesado (723 kg) na área tratada com duas passadas do SK 140, pelo mesmo fato da biomassa estar mais triturada. Pela mesma razão, a capacidade de área e a quantidade de biomassa enfardada pela Claas foram maiores na área tratada com duas passadas (0,32 ha/h e 11,91 t/ha, respectivamente) (Quadro 9).

O trator SK 140 foi avaliado no Bloco 2 do Site 3, com uma grande quantidade de biomassa por área (51,45 t/ha). A produtividade foi estimada em 0,28 ha/h realizando apenas uma passada e 0,17 ha/h realizando duas passadas. O SK 300 foi avaliado no Bloco 1 do Site 3, com a maior quantidade de biomassa por área (87,22 t/ha), e por isso apresentou melhor desempenho, sendo que a produtividade foi estimada em 0,33 ha/h.

Quadro 8. Dados operacionais no Site 3.

Máquina	Passadas	Área (ha)	Tempo (h)	Distância/fardo (m)	Fardos	
					No.	Peso (kg)
SK 140	1	0,23	0,81	-	-	-
SK 140	2	0,06	0,39	-	-	-
SK 300	1	0,21	0,62	-	-	-
Claas e MT545B	1	0,065	0,43	317,6	1	627,5
Claas e MT545B	2	0,061	0,19	287,1	1	722,8

Quadro 9. Desempenho das máquinas avaliadas e produtividade no Site 3.

	Claas e MT545B	
	1	2
No. de passadas	1	2
Tempo por fardo (min)	25,8	11,4
Fardos por hora	2,3	5,3
Capacidade de área (ha/h)	0,15	0,32
Toneladas por hora produtiva	1,46	3,80
Toneladas por hectare	9,69	11,91
Percentual de sub-bosque enfardado	19	23

3.2. Consumo de combustível

O consumo médio de combustível nos Sites 1 e 2 foi de 13,7 L/h para o sistema composto pela Bio-baler, 29,6 L/h para o sistema composto por SK 140-Claas e 35,3 L/h para o sistema composto por SK 300-Claas (Quadro 10). Entretanto, como os sistemas apresentaram diferentes produtividades, o consumo de combustível por tonelagem enfardada é uma comparação mais objetiva. Para o sistema composto pela Bio-baler, que requer apenas uma operação, o consumo de combustível foi de 6,23 L/t

(38,06 L/ha). Para o sistema Supertrak-Claas, que requer duas operações sucessivas, o consumo total foi de 7,15 L/t com o emprego do SK 140 e 9,03 L/t com o emprego do SK 300 (63,86 e 80,72 L/ha, respectivamente). Assim, o sistema composto pela Bio-baler consumiu menos combustível por tonelada e por hectare, mas o sistema Supertrak-Claas apresentou maior percentual de biomassa enfardada.

Quadro 10. Valores de consumo de combustível e produtividade.

	SK 140	SK 300	Bio-baler e MT565B	Claas e MT545B
Consumo horário (L/h)	14,73	20,40	13,70	14,91
Consumo específico (L/hp.h)	0,105	0,068	0,095	0,124
Capacidade de área (ha/h)	0,37	0,36	0,36	0,62
Capacidade produtiva* (t/h)	3,31	3,22	2,20	5,54
Combustível por unidade (L/t)	4,45	6,34	6,23	2,69
Supertrak e Claas (L/t)	7,15	9,03		

* Para os tratores SK a capacidade produtiva é equivalente à tonelagem enfardada.

3.3. Fardos

O Quadro 11 apresenta o volume e a densidade média dos fardos. A Claas produziu fardos menores, com diâmetro horizontal médio de 1,55 m, diâmetro vertical médio de 1,22 m e volume médio de 1,55 m³. A Bio-baler produziu fardos mais volumosos, com diâmetro horizontal médio de 1,31 m, diâmetro vertical médio de 1,28 m e volume médio de 1,70 m³. Os fardos produzidos pela Claas foram mais densos (404 kg/m³ em média) do que os fardos produzidos pela Bio-baler (308 kg/m³ em média), em virtude, em grande parte, do pré-tratamento feito pelos tratores Supertrak, que facilitou a compressão da biomassa no tambor da enfardadora.

Quadro 11. Volume e densidade médios dos fardos.

Máquina	Site 1		Site 2		Site 3	
	Volume ¹	Densidade ²	Volume ¹	Densidade ²	Volume ¹	Densidade ²
Bio-baler	1,74	295	1,67	321	-	-
Claas	1,63	385	1,53	373	1,50	455

¹ Médio, em metros cúbicos. ² Média, em quilogramas por metro cúbico.

Os fardos apresentaram maior densidade média (366 kg/m³) do que cavacos produzidos a partir de sub-bosque localizado em *Croatan National Forest*, no leste do Estado da Carolina do Norte, Estados Unidos (282 kg/m³) (ROISE e HANNUM, 2008). Espera-se, portanto, que o enfardamento otimize o transporte da biomassa até a planta

de conversão energética, pelo aumento de peso da carga transportada e conseqüente redução do custo por tonelada transportada. Por exemplo, um caminhão plataforma (*flatbed*) adequado para o transporte de fardos possui as dimensões de carga de 2,4 x 16,6 m. Assumindo a altura máxima permitida para a carga (2,6 m), haveria a possibilidade de transportar 40 fardos com volume médio próximo de 1,55 m³. Considerando o peso médio dos fardos, a carga teria 21,4 t com os fardos da Bio-baler e 22,8 t com os fardos da Claas. A tara do veículo gira em torno de 12,5 a 13,5 t. Então, o peso bruto total (tara + carga) aproximar-se-ia do limite máximo de peso permitido na região, que é de 36,3 t.

O Quadro 12 apresenta o poder calorífico e conteúdo de umidade dos fardos. O poder calorífico superior (PCS) da biomassa seca, determinado em calorímetro, foi maior no Site 3 (5.024 kcal/kg) devido à maior quantidade de regeneração de Pinus no sub-bosque. O PCS médio nos Sites 1 e 2 (4.888 kcal/kg) está de acordo com o valor médio obtido por Roise e Hannum (2008) para a biomassa de sub-bosque localizado em *Croatan National Forest* (4.889 kcal/kg).

O poder calorífico inferior (PCI) é proporcional ao conteúdo de massa seca e umidade no material combustível. À medida que o conteúdo de umidade aumenta, a proporção de massa seca diminui e, da mesma forma, o poder calorífico diminui. Além disso, uma parte do calor é perdida na evaporação do conteúdo de umidade interno⁹ (INCE, 1977). Assim, o PCI foi maior no Site 2 (2.790 kcal/kg) devido ao menor conteúdo de umidade (38% - base úmida).

Os fardos apresentaram conteúdo de umidade médio entre 38% e 45% em base úmida. Segundo alguns autores, o conteúdo de umidade máximo que a madeira pode conter para entrar em combustão tem sido calculado em torno de 65% a 70% em base úmida (QUIRINO et al., 2005).

No Site 1, o aporte energético do combustível¹⁰ consumido pelas máquinas nas operações de corte e enfardamento da biomassa foi de 30.363 kcal/fardo (3,49 L/fardo) para o sistema composto pela Bio-baler e 44.979 kcal/fardo (5,17 L/fardo) para o sistema SK 140-Claas. No Site 2, os valores foram 26.883 kcal/fardo (3,09 L/fardo) para o sistema da Bio-baler, 31.929 kcal/fardo (3,67 L/fardo) para o sistema SK 140-Claas e 43.326 kcal/fardo (4,98 L/fardo) para o sistema SK 300-Claas. Contudo, o

⁹ Considerou-se que a perda de energia é de 600 kcal/kg de água.

¹⁰ Considerou-se que o poder calorífico inferior do diesel é 8.700 kcal/litro.

aporte energético do combustível consumido no carregamento e transporte dos fardos também deve ser considerado no balanço energético.

Considerando apenas o corte e enfardamento, a razão entre o poder calorífico inferior dos fardos e o aporte energético do combustível consumido variou de 36 a 56, ou seja, os sistemas avaliados produziram entre 36 e 56 vezes mais energia do que consumiram. Mesmo após considerar o combustível consumido no carregamento e transporte a uma distância razoável, espera-se que a biomassa do sub-bosque florestal proporcione um benefício energético positivo em uma planta de conversão energética ou de aquecimento em pequena escala.

Quadro 12. Poder calorífico e conteúdo de umidade dos fardos em base úmida.

Máquina	Bio-baler		Claas		
	1	2	1	2	3
PCS (kcal/kg)	4.915	4.872	4.879	4.884	5.024
Umidade – base úmida (%)	45	38	42	38	44
PCI – base úmida (kcal/kg)	2.435	2.798	2.552	2.782	2.524
PCI – base úmida (kcal/fardo)	1248905	1498256	1601016	1588156	1715808

PCS = poder calorífico superior. PCI = poder calorífico inferior.

3.4. Custos e benefícios

O Quadro 13 apresenta o custo das máquinas avaliadas. O tratamento do Site 3 com duas passadas do SK 140, apesar de aumentar o custo desta operação por hectare, adicionou benefícios com o melhor preparo da biomassa, permitindo aumento da produtividade da Claas e aumento da biomassa enfardada por hectare. Conseqüentemente, o custo do sistema SK 140-Claas foi menor na área tratada com duas passadas. No Site 2, o trator SK 300 apresentou maior custo do que o trator SK 140. Porém, o SK 300 tornou-se mais competitivo trabalhando nas condições extremas do sub-bosque do Site 3, uma vez que seu custo pode ser comparado com o custo do SK 140 realizando duas passadas.

A Bio-baler apresentou maior custo do que a Claas devido, principalmente, ao seu alto valor de aquisição e menor produtividade. Entretanto, deve-se considerar o custo dos sistemas apresentado no Quadro 14, tendo em vista que a Bio-baler realiza todas as operações e que a Claas requer o pré-tratamento da biomassa. Como os fardos não possuem o mesmo tamanho, o custo por tonelada é uma comparação mais objetiva.

No Site 1, a Bio-baler custou um pouco menos do que o sistema SK 140-Claas. (US\$ 2,15/t), mas o contrário ocorreu no Site 2.

O custo por unidade energética foi menor para o sistema SK 140-Claas. No Site 1, o poder calorífico inferior médio dos fardos da Claas foi maior, em função do menor conteúdo de umidade, resultando num custo por unidade energética ligeiramente menor. O mesmo ocorreu no Site 2, devido ao menor custo por tonelada (Quadro 14).

O Quadro 15 resume os custos dos sistemas e alguns potenciais benefícios da colheita mecanizada de sub-bosque florestal. O custo por unidade de área com a Bio-baler é sempre menor do que o do sistema Supertrak-Claas. Na verdade, o sistema Supertrak-Claas pode se tornar ainda mais oneroso do que os valores indicados no Quadro se o componente mais eficiente do sistema (o trator ou a enfardadora) não puder ser usado em outras atividades enquanto estiver esperando pelo outro componente. Em alguns casos, o tempo de espera de um dos componentes do sistema pode ser mais de 50% do tempo.

A biomassa enfardada poder ser aproveitada energeticamente ou para outras finalidades. O valor monetário vai depender do contexto local para o uso da energia e da disponibilidade de plantas industriais capazes de consumir essa biomassa. O outro benefício, expresso em percentual de enfardamento, é mais difícil de ser convertido em valor monetário. Vários níveis de enfardamento podem ser aceitáveis, dependendo da necessidade de intervenção ou do risco de incêndios na área. Porém, a respeito da tecnologia de colheita, espera-se que no futuro a capacidade de enfardamento seja aumentada, aumentando-se a proporção de biomassa enfardada.

Quadro 13. Custo das máquinas avaliadas por site.

Máquina	Site 1			Site 2			Site 3		
	US\$/he	ha/h	US\$/ha	US\$/he	ha/h	US\$/ha	US\$/he	ha/h	US\$/ha
SK 140 (1 passada)	91,41	0,30	304,70	91,41	0,44	207,75	91,41	0,28	326,47
SK 140 (2 passadas)	-	-	-	-	-	-	91,41	0,17	537,71
SK 300	-	-	-	157,64	0,36	437,90	157,64	0,33	477,71
Bio-baler e MT565B	95,89	0,42	228,31	96,27	0,30	320,91	-	-	-
Claas e MT545B ¹	81,64	0,72	113,40	81,02	0,51	158,87	76,55	0,15	510,35
Claas e MT545B ²	-	-	-	-	-	-	78,62	0,32	245,70

¹ Na área tratada com uma passada do SK 140. ² Na área tratada com duas passadas do SK 140. he = hora efetiva.

Quadro 14. Custo dos sistemas por unidade produtiva e por site.

Sistema	Site 1			Site 2			Site 3		
	US\$/fardo	US\$/t	US\$/GJ*	US\$/fardo	US\$/t	US\$/GJ*	US\$/fardo	US\$/t	US\$/GJ*
Bio-baler e MT565B	24,47	47,27	4,64	21,68	39,86	3,40	-	-	-
SK 140 (1 passada) + Claas e MT545B	31,11	49,42	4,62	21,30	37,60	3,23	54,69	86,36	8,17
SK 140 (2 passadas) + Claas e MT545B	-	-	-	-	-	-	51,20	80,85	7,65
SK 300 (1 passada) + Claas e MT545B	-	-	-	34,68	61,21	5,25	-	-	-

GJ (Giga Joule) = 238.845,9 kcal. * Considerando o poder calorífico inferior médio da biomassa apresentado no Quadro 12.

Quadro 15. Custos* e benefícios (biomassa enfardada, percentual de sub-bosque enfardado) da colheita mecanizada por site.

Sistema	Site 1			Site 2			Site 3		
	Custo (US\$/ha)	BE (t/ha)	SE (%)	Custo (US\$/ha)	BE (t/ha)	SE (%)	Custo (US\$/ha)	BE (t/ha)	SE (%)
Bio-baler e MT565B	228,31	4,83	29,2	320,91	8,05	43	-	-	-
SK 140 (1 passada) + Claas e MT545B	418,10	8,46	51,1	366,62	9,75	52	836,82	9,69	19
SK 140 (2 passadas) + Claas e MT545B	-	-	-	-	-	-	783,41	11,91	23

* Os custos do sistema Supertrak-Claas foram calculados assumindo-se os componentes (trator e enfardadora) com operações independentes. Caso contrário, os custos 418,10; 366,62; 836,82 e 783,41 poderiam ser tão altos quanto 576,85; 391,90; 1.119,75 e 1.000,20 (US\$/ha), respectivamente. BE = biomassa enfardada. SE = sub-bosque enfardado.

4. CONCLUSÕES

A Bio-baler possui a vantagem de desempenhar as funções de corte, picagem e embalagem da biomassa em uma única operação. Em relação ao sistema trator-enfardadora, a Bio-baler apresentou menor custo de aquisição e menor consumo de combustível, que resultaram em menor custo por área. Mas, a Bio-baler apresentou menor produtividade, enfardou menor percentual de biomassa por área e teve limitações de trabalho em condições mais densas.

O sistema Supertrak-Claas apresentou maior custo de aquisição, maior consumo de combustível e, conseqüentemente, maior custo por área. Porém, o sistema trator-enfardadora se torna mais competitivo em termos de custo por unidade energética, pois apresentou maior produtividade e enfardou maior percentual de biomassa por área.

Os dois sistemas avaliados apresentaram balanço energético positivo, ou seja, produziram mais energia do que consumiram.

A colheita e o enfardamento de biomassa florestal para aproveitamento energético mostrou-se tecnicamente viável, mas com limitações em relação ao diâmetro e à quantidade de biomassa disponível por unidade de área. A viabilidade econômica vai depender do contexto local para o uso da energia e da disponibilidade de plantas industriais capazes de consumir essa biomassa.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Robert Rummer, líder de projetos da Southern Research Station, USDA Forest Service, Auburn, Alabama, Estados Unidos, por viabilizar a minha participação neste projeto. Ao Dr. Philippe Savoie, pesquisador do Agriculture and Agri-Food Canada de Québec, pelas valiosas correções e sugestões. À equipe de coleta de dados, Eng. Florestal John Klepac e Sr. James Dowdell, da Southern Research Station, USDA Forest Service, Auburn, Alabama, Estados Unidos, e Prof. Dr. Fernando Seixas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Esalq. Mais uma vez, ao John Klepac

e ao Prof. Fernando Seixas pela contribuição na análise dos dados e na discussão dos resultados. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

FELKER, P.; McLAUHLAN, R.A.; CONKEY, A.; BROWN, S. Case study: development of a swath harvester for small diameter (<10 cm) woody vegetation. **Biomass and Bioenergy**, v. 17, 1999. p. 1-17.

FRIDLEY, J.L.; BURKHARDT, T.H. Densifying forest biomass into large round bales. **Transactions of the ASAE**, v. 27, n. 5, 1984. p. 1277-1281.

INCE, P.J. **Estimating effective heating value of wood or bark fuels at various moisture contents**. Madison, WI, US: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1977. 9 p. (Gen. Tech. Report FPL 13).

LAVOIE, F.; SAVOIE, P.; D'AMOURS, L.; JOANNIS, H. Development and field performance of a willow cutter-shredder-baler. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CROP HARVESTING AND PROCESSING, 2007, Louisville, KY, US. **Proceedings**... Louisville, KY, US: ASABE, 2007. (ASABE Publication Number 701P0307e).

LAVOIE, F.; SAVOIE, P.; D'AMOURS, L. Design and evaluation of a versatile woody biomass Harvester-Baler. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2008, Providence, RI, US. **Proceedings**... Providence, RI, US: ASABE, 2008. (Paper Number 083597).

MIYATA, E.S. **Determining fixed and operating costs of logging equipment**. St. Paul, MN, US: USDA Forest Service, 1980. 16 p. (Gen. Tech. Report NC-55).

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, 2005. p. 100-106.

SAVOIE, P.; D'AMOURS, L.; LAVOIE, F.; LECHASSEUR, G.; JOANNIS, H. Development of a Cutter-Shredder-Baler to harvest long-stem willow. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2006, Portland, OR, US. **Proceedings**... Portland, OR, US: ASABE, 2006. 9 p. (Paper Number 061016).

STOKES, B.J.; SIROIS, D.L.; WOODFIN, S.L. Preliminary evaluation of steel-roller round baler for woody biomass baling. In: ANNUAL MEETING OF THE SOUTHERN FOREST BIOMASS WORKSHOP, 9, 1987, Biloxi, MS, US. **Proceedings**... Mississippi State, MS, US: Department of Forestry, 1987. p. 167-174.

ROISE, J.P.; HANNUM, L. The Kraken: Testing the FECON harvesting machine for small diameter woody biomass. In: ANNUAL MEETING OF THE COUNCIL ON FOREST ENGINEERING, 31, 2008. Charleston, SC, US. **Proceedings...** BAKER, S.A.; BOLDING, M.C.; GREENE, W.D. (Eds.). Athens, GA, US: Warnell, Georgia University, 2008. p. CD-ROM.

RUMMER, R. **Administrative study plan for harvesting and utilizing biomass for energy on the Osceola National Forest.** Auburn, AL, US: USDA Forest Service, Southern Research Station, 2007. 7 p. (Research Project, Forest Operations Research to Achieve Sustainable Management, 4703).

WINDELL, K.; BRADSHAW, S. **Understory biomass reduction methods and equipment catalog.** Missoula, MT, US: USDA Forest Service, Missoula Technology Development Center, 2000. 156 p. (Tech Report 0051-2826-MTDC).

REMOÇÃO E CAVAQUEAMENTO DE ÁRVORES COMPLETAS

RESUMO – O objetivo deste trabalho foi analisar um sistema de remoção e cavaqueamento de árvores completas para aproveitamento energético. Os custos de produção foram estimados e amostras da biomassa cavaqueada foram enviadas para análise laboratorial. O trabalho foi realizado nos Estados Unidos, em uma floresta com densidade de 4.657 árvores por ha (86,5% *Pinus* spp). O sistema foi composto por escavadora hidráulica equipada com grua de demolição, trator de esteiras, carregadora frontal, máquina base com grua hidráulica e triturador florestal. A coleta de dados baseou-se em observação e cronometragem do sistema. A produtividade de remoção das árvores completas, realizada pela escavadora hidráulica, foi de 579,3 m²/he. A produtividade do triturador foi de 28,01 t/he. O poder calorífico superior médio da biomassa foi de 4.173 kcal/kg, o conteúdo de umidade médio foi de 40% em base úmida e o teor médio de cinzas nas amostras foi de 11,47%. O consumo de combustível do sistema foi estimado em 205,52 L/he. O sistema produziu 35,5 vezes mais energia do que consumiu e o seu custo foi de US\$ 565,14/he (US\$ 20,18/t e US\$ 2,14/GJ). A viabilidade econômica vai depender do contexto local para o uso da energia e da disponibilidade de plantas industriais capazes de consumir essa biomassa.

Palavras-chave: biomassa florestal, triturador, limpeza de área, energia renovável.

EXTRACTION AND HOGGING OF COMPLETE TREES

ABSTRACT – The objective of this study was to evaluate a system for harvesting and hogging complete trees for energy use. Production costs were estimated and chips samples were sent for laboratory analysis. The study was conducted in the United States, in a forest with 4,657 trees per ha (86.5% *Pinus* spp). The system was comprised of hydraulic excavator equipped with demolition grapple, bulldozer, front loader, knuckleboom loader and wood hog. Data collection was based on system observation and timing. Productivity of extraction of complete trees, carried out by hydraulic excavator, was 579.3 m²/PMH. The productivity of the wood hog was 28.01 t/PMH.

The average heat value of dry biomass was 4,173 kcal/kg. The average moisture content was 40% on wet basis. The average content of ash in the samples was 11.47%. System fuel consumption was estimated at 205.52 L/h. The system produced 35.5 times more energy than it consumed. The system cost was US\$ 565.14/PMH (US\$ 20.18/t and US\$ 2.14/GJ). The economic feasibility will depend on the local context for the use of energy and the availability of manufacturing plants capable of consuming the biomass.

Key-words: forest biomass, wood hog, land clearing, renewable energy.

1. INTRODUÇÃO

A colheita de árvores completas contempla a remoção de toda a árvore, incluindo o toco e seu sistema radicular. Primeiramente foi sugerida por Sproull et al. (1957), com o objetivo de aumentar o rendimento de fibras para celulose. Atualmente, a demanda por fontes alternativas de biomassa para energia tem renovado o interesse pela colheita de árvores completas, especialmente em países com clima temperado.

O aproveitamento energético de tocos e raízes tem ocorrido naqueles países porque o padrão de ciclagem de nutrientes em regiões temperadas é diferente do padrão de regiões tropicais. A decomposição da matéria orgânica nas regiões temperadas é lenta. Por isso, uma grande parcela da matéria orgânica e dos nutrientes permanece no solo e nos sedimentos (ODUM, 1988).

A colheita de tocos e raízes para energia pode ser atrativa, uma vez que representam entre 23 e 25% da massa total do tronco (KALLIO e LEINONEN, 2005). Por isso, apesar das restrições ambientais, especialmente em relação à sustentabilidade do solo, o aproveitamento de tocos e raízes para fins energéticos tem rapidamente emergido da fase de teste para a prática, como resultado de experiências positivas e pioneiras em alguns países (HAKKILA, 2004).

Além do potencial energético, tocos e raízes também têm sido removidos por diversas razões específicas, tais como necessidade de limpeza de área; prática sanitária, visando a erradicação de fungos que podem comprometer a futura floresta (VASAITIS et al., 2008); ou para facilitar operações silviculturais subsequentes, como preparo de solo e replantio, bem como aumentar a produtividade e a qualidade dessas operações, com consequente redução de custos (SAARINEN, 2006).

Neste trabalho, apresenta-se um estudo de caso onde houve a necessidade de remoção de tocos e raízes objetivando a limpeza da área para a realização de obras de

infra-estrutura. A decisão pela colheita e cavaqueamento de árvores completas para aproveitamento energético foi tomada em função das restrições de queima da biomassa na área (por se tratar de propriedade militar) e de disposição de resíduos lenhosos em aterros sanitários locais. Além dessas restrições, a possibilidade de retorno financeiro pelo aproveitamento energético da biomassa contribuiu para a tomada de decisão.

Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar um sistema de remoção e cavaqueamento de árvores inteiras para aproveitamento energético, bem como estimar os custos e determinar o balanço energético desse sistema.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de trabalho

Este trabalho foi realizado em uma área de aproximadamente 12 hectares, localizada em uma propriedade militar (*Fort Benning*) próxima ao município de Columbus, Estado da Geórgia, sul dos Estados Unidos. A floresta tinha cerca de 80 anos de idade e densidade média de 4.657 árvores por hectare (Quadro 1). Em média, 86,5% das árvores eram do gênero *Pinus*, principalmente da espécie *Pinus taeda* com os restantes 13,5% compostos por espécies folhosas.

Quadro 1. Dados dendrométricos do inventário pré-corte.

Classe de DAP	Árvores/ha	DAP médio (cm)	Altura média (m)
< 8,0 cm	2.895	4,8	-
8,1 – 18,0 cm	1.636	11,9	11,23
> 18,1 cm	126	18,3	-
Total	4.657	7,7	-

DAP = diâmetro à altura do peito.

2.2. Sistema de colheita observado

O sistema empregado foi composto por uma escavadora hidráulica Caterpillar 330C (247 hp) equipada com grua de demolição, um trator de esteiras Caterpillar D5G (99 hp), uma carregadora frontal John Deere 544J (149 hp), uma máquina base com

grua hidráulica Prentice 310E (173 hp) e um triturador florestal Morbark 4600XL (800 hp) (Figuras 1 e 2).



Figura 1. Escavadora hidráulica Caterpillar 330C e trator de esteiras Caterpillar D5G.



Figura 2. Triturador florestal Morbark 4600XL abastecido por grua hidráulica Prentice 310E (esquerda) e carregadora frontal John Deere 544J (direita).

A etapa de remoção das árvores, realizada pela escavadora hidráulica Caterpillar 330C, foi dividida nos seguintes elementos do ciclo operacional: remoção das árvores completas; manuseio e enleiramento das árvores removidas; remoção das raízes remanescentes no solo (quando o sistema toco-raízes não puder ser removido intacto); e deslocamento na área de trabalho. Após a etapa de remoção, o trator de esteiras Caterpillar D5G realizava o amontoamento da biomassa.

A etapa de cavaqueamento compreendeu três atividades subsequentes: baldeio da biomassa (realizado pela carregadora frontal John Deere 544J), abastecimento do triturador (realizado pela máquina base com grua hidráulica Prentice 310E) e cavaqueamento da biomassa (realizado pelo triturador florestal Morbark 4600XL).

A carregadora frontal realizava o baldeio da biomassa (disposta em montes na área de trabalho) até a área de alcance da grua hidráulica. Os elementos do ciclo operacional da carregadora frontal nesta atividade foram: carregamento, deslocamento carregado, descarregamento, deslocamento descarregado e espera ou tempo parado.

Em seguida, a grua hidráulica realizava a alimentação do triturador com a biomassa. Os elementos do ciclo operacional da grua hidráulica na atividade de alimentação foram: carregamento, deslocamento descarregado, espera carregada, espera descarregada e organização da biomassa no triturador. O carregamento compreendeu a obtenção de material na pilha pela grua e o seu subsequente deslocamento carregado até a esteira de alimentação do triturador, quando então o material era solto. O deslocamento descarregado iniciava-se quando o material era solto sobre a esteira de alimentação do triturador e a grua se deslocava descarregada em direção à pilha de material para iniciar o carregamento. A espera carregada compreendeu o tempo que a grua perdia sobre a esteira do triturador, geralmente para evitar sobrecarga na alimentação. A espera descarregada compreendeu o tempo que a carregadora perdia descarregada, seja sobre a esteira de alimentação do triturador ou próximo à pilha de material aguardando a carregadora frontal. A organização da biomassa no triturador compreendia a atividade que a grua realiza na esteira de alimentação do triturador, geralmente para evitar sobrecarga na alimentação ou perda de material que eventualmente caía para fora da calha.

2.3. Coleta de dados

A coleta de dados baseou-se em observação e cronometragem do sistema de remoção e cavaqueamento. A produtividade da etapa de remoção das árvores completas, em metros quadrados por hora efetiva, foi obtida a partir do tempo efetivo de remoção e da área trabalhada. Foi amostrado um turno de trabalho da remoção. A produtividade da etapa de cavaqueamento, em toneladas de cavacos produzidos por hora efetiva, foi obtida a partir do tempo efetivo para o carregamento completo dos caminhões e da respectiva pesagem da carga de cavacos na planta energética. Foram amostrados quatro carregamentos completos. Foram coletadas oito amostras de cavacos para análise laboratorial do conteúdo de umidade, poder calorífico e teor de cinzas do material.

2.4. Custos

Os custos operacionais foram estimados por meio da metodologia descrita por Miyata (1980) (Ver Anexo). O consumo de combustível das máquinas foi estimado conforme a metodologia do mesmo autor, a partir da potência do motor. A estimativa dos custos baseou-se nos componentes descritos no Quadro 2.

Quadro 2. Componentes do custo das máquinas.

Descrição	Escavadora hidráulica	Trator de esteiras	Carregadora frontal	Grua hidráulica	Triturador
Valor de aquisição (US\$)	350.000	175.000	170.000	120.000	475.000
Vida útil – máquina (anos)	7	7	7	7	7
Grua de demolição (US\$)	30.000	-	-	-	-
Vida útil – grua (anos)	5	-	-	-	-
Valor de revenda (% aquisição)	20	20	20	20	20
Dentes (US\$/cada)	-	-	-	-	20,00
Quantidade de dentes*	-	-	-	-	24
Reparos e manutenção (% depreciação)	50	50	50	50	50
Taxa de juros anual (%)	10	10	10	10	10
Seguro (% Investimento Médio Anual)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Combustível (US\$/L)	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Lubrificação (% combustível)	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8
Horas anuais programadas (hp)	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Eficiência operacional (%)	80	80	80	80	80
Operação – salário (US\$/hp)	12,00	12,00	12,00	12,00	-
Operação – benefícios (%)	30	30	30	30	-

* Segundo informação do prestador de serviço, são consumidos, em média, 60 dentes por mês.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Etapa de remoção

A produtividade de remoção das árvores completas realizada pela escavadora hidráulica foi de 579,3 m² por hora efetiva. Após a remoção, a biomassa era amontoada pelo trator de esteiras, o qual teve produtividade dependente da escavadora hidráulica.

3.2. Etapa de cavaqueamento

O carregamento foi o elemento do ciclo operacional da grua hidráulica que mais demandou tempo (44,8%), seguido do deslocamento carregado (31,3%). Mas, observa-se que houve uma grande perda de tempo na espera descarregada (19,2%) (Figura 3). A espera descarregada se deveu ao tempo perdido pela grua ao aguardar o abastecimento pela carregadora frontal. Este ponto de demora foi identificado como um ponto de estrangulamento do sistema. Isso indica que o sistema de cavaqueamento pode ser otimizado nesse sentido, com consequente aumento da produtividade.

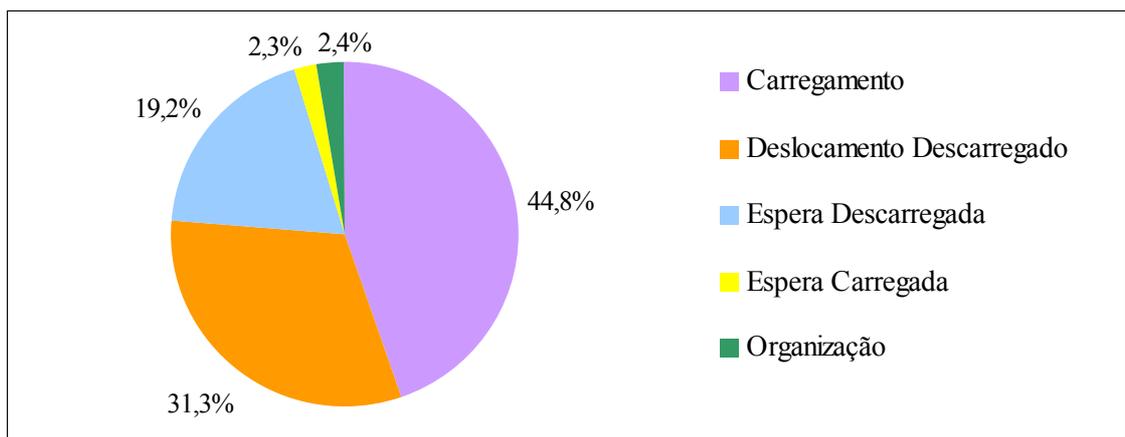


Figura 3. Elementos do ciclo operacional da grua hidráulica do triturador.

A produtividade do triturador foi de 28,01 toneladas por hora efetiva. A produtividade do cavaqueamento foi equivalente à produtividade do triturador. Isso porque a carregadora frontal não formava estoques de biomassa e o triturador era frequentemente deslocado de acordo com a disponibilidade e a distância da biomassa.

3.3. Qualidade dos cavacos

O Quadro 3 apresenta o resultado da análise laboratorial das amostras da biomassa cavaqueada. O teor de umidade médio foi de 40%, variando de 35 a 50% (base úmida). O poder calorífico superior (PCS) do material seco, determinado em calorímetro, variou de 2.755,1 a 4.626,7 kcal/kg, com média de 4.173 kcal/kg.

O poder calorífico superior varia com a composição química das espécies e conforme os componentes das árvores, sendo que lignina, resinas, terpenos e ceras possuem maior poder calorífico do que celulose e hemicelulose. Assim, as raízes frequentemente possuem alto poder calorífico, muitas vezes maior do que a madeira (NURMI, 1997).

O poder calorífico superior mínimo determinado correspondeu à amostra com maior teor de cinzas. Observou-se que a variação do PCS foi inversamente proporcional ao teor de cinzas, ou seja, quanto maior o teor de cinzas, menor o PCS das amostras.

Quadro 3. Resultado da análise laboratorial das amostras do material.

	Mínimo	Máximo	Média
PCS (kcal/kg)	2.755,1	4.626,7	4.173,0
Umidade – base úmida (%)	35	50	40
Cinzas (%)	0,78	44,76	11,47

PCS = poder calorífico superior.

A combustão da biomassa resulta em cinzas, constituídas em grande parte por elementos inorgânicos. A composição química e a quantidade resultante de cinzas variam conforme a espécie, o clima, o solo e o método de carbonização (CAMPBELL, 1990). Entretanto, as impurezas contidas na biomassa elevam o conteúdo de cinzas resultante da combustão. O teor de cinzas na madeira sem casca é de cerca de 0,5%. Esse percentual aumenta para 1% quando a casca é queimada. Em cavacos de árvores com casca e galhos, o teor de cinzas aumenta significativamente para cerca de 5-10% ou mais, dependendo da quantidade de impurezas no material (KOFMAN, 2006). Na Finlândia, cavacos de tocos e raízes apresentam teores de cinzas variando de 2-20%, podendo conter até mais do que isso (ALAKANGAS, 2005).

Neste estudo, devido à grande variabilidade nos resultados da análise do teor de cinzas, amostras do material foram enviadas para dois laboratórios¹¹. Contudo, a análise estatística dos resultados mostrou que não houve diferença significativa entre os dois laboratórios para a análise do teor de cinzas. O valor de F calculado (0,79) foi menor que o valor de F tabelado (7,95), indicando que não há diferença entre os resultados das análises para o nível de 99% de probabilidade (Quadro 4).

Quadro 4. ANOVA – Análise da variância para os laboratórios.

Fontes da variação	GL	SQ	QM	F calculado	P
Laboratórios	117,13	1	117,13	0,79	0,384
Erro	3263,13	22	148,32		
Total	3380,27	23			

Neste estudo, o teor médio de cinzas foi de 11,47% (Quadro 3). Apesar da grande amplitude dos teores apresentados (0,78 – 44,76%), cinco do total de oito amostras apresentaram teor de cinzas abaixo de 10%. Ainda assim, destaca-se que as cinzas interferem na eficiência e na economia da combustão da biomassa, além de gerarem o problema da disposição final. O manejo das cinzas durante a geração de energia e a reciclagem dessas cinzas no ecossistema florestal são questões importantes no uso energético da biomassa florestal. Por isso, devem-se buscar alternativas para reduzir o seu teor na biomassa. Por essa razão, recomenda-se que haja uma pré-secagem da biomassa no campo. Além de favorecer a redução do conteúdo de umidade, a permanência dos resíduos no campo após a extração possibilita também a redução das impurezas na biomassa (STUPAK et al., 2008).

3.4. Custos

O sistema de remoção e cavaqueamento de árvores completas apresentou o custo de US\$ 565,14 por hora efetiva, o que representa um custo de US\$ 20,18 por tonelada de cavacos produzidos. A etapa de remoção apresentou o custo de US\$ 192,47/he e a etapa de cavaqueamento apresentou o custo de US\$ 157,08/he (Quadro 6). Assumindo o poder calorífico inferior (PCI) de 2.263,8 kcal/kg¹², o custo total por unidade energética

¹¹ Laboratórios onde foram realizadas as análises: Agronomy & Soils Department Lab e Biosystems Engineering Lab, da Auburn University.

¹² Calculado a partir do PCS médio (4.173 kcal/kg) e do conteúdo de umidade médio (40%), considerando a perda de energia de 600 kcal/kg de água.

é de US\$ 2,13 por Giga Joule. O valor monetário da biomassa cavaqueada vai depender do contexto local para o uso da energia e da disponibilidade de plantas industriais capazes de consumir essa biomassa. Mas, deve-se considerar também o benefício da limpeza da área. Assim, o custo de produção dos cavacos deve ser comparado com outras formas de descarte dessa biomassa lenhosa.

Quadro 6. Estimativa do consumo de combustível e custo das máquinas.

Máquina	Consumo de combustível (L/h)	US\$/he	t/he	US\$/t	US\$/GJ
Escavadora hidráulica	34,58	127,07	-	-	-
Trator de esteiras	13,86	65,40	-	-	-
Sub-total – Remoção	48,44	192,47	-	-	-
Carregadora frontal	20,86	73,39	-	-	-
Grua hidráulica	112,00	227,19	-	-	-
Triturador	24,22	72,09	-	-	-
Sub-total – Cavaqueamento	157,08	372,67	28,01	13,31	1,40
Total – Sistema	205,52	565,14	28,01	20,18	2,13

he = hora efetiva. GJ (Giga Joule) = 238.845,9 kcal.

A estimativa do consumo de combustível total do sistema de remoção e cavaqueamento foi de 205,52 litros por hora efetiva. A razão entre o PCI dos cavacos e o aporte energético do combustível¹³ estimado para o consumo é de 35,5. Portanto, o sistema demonstra ser capaz de produzir mais energia do que teoricamente consome. Mesmo considerando o transporte dos cavacos à uma distância razoável, ainda espera-se um balanço energético positivo.

4. CONCLUSÕES

O baldeio, realizado pela carregadora frontal, foi considerado ponto de estrangulamento do sistema por resultar em perda de tempo na atividade de abastecimento do triturador. Cerca de 19,2% do ciclo operacional da grua hidráulica compreendeu a espera descarregada, o que indica que o sistema pode ser otimizado.

A atividade de empilhamento dos resíduos pelo trator de esteiras deveria ser reconsiderada no sistema, por contribuir para o aumento de impurezas na biomassa.

¹³ Considerou-se que o poder calorífico inferior do diesel é de 8.700 kcal/litro.

O sistema de cavaqueamento apresentou balanço energético positivo, ou seja, produziu mais energia do que consumiu, mas a viabilidade econômica vai depender do contexto local para o uso da energia e da disponibilidade de plantas industriais capazes de consumir essa biomassa. Entretanto, o benefício da limpeza da área deve ser comparado com o custo de alternativas para a disposição dessa biomassa.

AGRADECIMENTOS

À Dra. Dana Mitchell, pesquisadora da Southern Research Station do USDA Forest Service, Auburn, Alabama, Estados Unidos, por viabilizar este trabalho. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ALAKANGAS, E. **Properties of wood fuels used in Finland**. Jyväskylä, Finland: VTT Processes, 2005. 90 p. (Project Report PRO2/P2030/05 – Project C5SU00800).

CAMPBELL, A.G. Recycling and disposing of wood ash. **Tappi Journal**, v. 73, n. 9, 1990. p. 141-146.

KALLIO, M; LEINONEN, A. **Production technology of forest chips in Finland**. Jyväskylä, Finland: VTT, 2005. 103 p. (Project Report PRO2/P2032/05).

KOFMAN, P.D. **Quality wood chip fuel**. Dublin, Ireland: COFORD, 2006. 4 p. (Harvesting/Transportation n. 6)

HAKKILA, P. **Developing technology for large-scale production of forest chips**. Helsinki, Finland: Tekes, 2004. 99 p. (Wood Energy Technology Programme 1999–2003. Final Report 6/2004).

MIYATA, E.S. 1980. **Determining fixed and operating costs of logging equipment**. St. Paul, MN, US: USDA Forest Service, 1980. 16 p. (Gen. Tech. Report NC-55).

NURMI, J. Heating values of mature trees. **Acta Forestalia Fennica**, n. 256, 1997. 28 p.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 434 p.

SAARINEN, V. The effects of slash and stump removal on productivity and quality of forest regeneration operations – preliminary results. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, 2006. p. 349-356.

SPROULL, R. C.; PARKER, R. B.; BELVIN, W. L. Whole tree harvesting. **Forest Products Journal**, v. 7, n. 4, 1957. p. 131-134.

STUPAK, I.; ASIKAINEN, A.; RÖSER, D.; PASANEN, K. Review of recommendations for forest energy harvesting and wood ash recycling. In: RÖSER, D.; ASIKAINEN, A.; RAULUND-RASMUSSEN, K.; STUPAK, I. (Eds.). **Sustainable use of forest biomass for energy**. Denmark: Springer, 2008. Chapter 7, p. 155-196.

VASAITIS, R.; STENLID, J.; THOMSEN, I. M.; BARKLUND, P.; DAHLBERG, A. Stump removal to control root rot in forest stands. A literature study. **Silva Fennica**, v. 42, n. 3, 2008. p. 457-483.

4. CONCLUSÃO GERAL

As tecnologias de colheita de biomassa florestal para aproveitamento energético se baseiam na redução da biomassa em cavacos e/ou na agregação deste material, formando unidades de alta densidade. As possibilidades de mecanização são variadas e a escolha do sistema vai depender das condições locais, cabendo adaptações.

Neste trabalho, os três sistemas avaliados apresentaram balanço energético positivo, ou seja, produziram mais energia do que consumiram, e ainda demonstraram ser tecnicamente viáveis nas condições estudadas. Mas, apresentaram a possibilidade de serem otimizados.

A viabilidade econômica da colheita mecanizada de biomassa florestal para energia vai depender do contexto local, como da disponibilidade de plantas industriais capazes de consumir essa biomassa, da distância de transporte e de opções e preços locais de outros combustíveis. Contudo, deve-se considerar que o aproveitamento energético da biomassa florestal gera receita, podendo viabilizar economicamente o aproveitamento de resíduos florestais e atividades de manejo e tratamentos silviculturais.

5. RECOMENDAÇÃO

Na tomada de decisão e planejamento da colheita de biomassa florestal para energia devem ser considerados os impactos ambientais da atividade para cada caso específico. Nas condições brasileiras, devem ser realizados estudos focando os custos ambientais da atividade, especialmente no que se refere a questão da exportação de nutrientes e da manutenção da fertilidade do sítio. Contudo, medidas podem ser tomadas para minimizar a exportação de nutrientes, tais como: deixar parte dos resíduos, especialmente folhas, e alternar rotações com e sem aproveitamento dos resíduos.

ANEXO

METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE CUSTOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS FLORESTAIS

A seguinte metodologia para estimativa de custos de máquinas e equipamentos foi descrita por Miyata (1980). De acordo com o autor, o custo total é composto por custos fixos, custos operacionais e custos com mão-de-obra.

1. CUSTOS FIXOS

Os custos fixos não variam com as horas de operação, não sendo afetados pela quantidade de uso da máquina ou do equipamento. Incluem a depreciação, os juros sobre o capital investido, os seguros e os impostos.

1.1. Depreciação

A depreciação refere-se à perda de valor de máquinas e equipamentos, resultante do desgaste pelo uso ou por obsolescência. A depreciação é função do investimento inicial, da vida útil estimada e da quantia, denominada valor residual, que se espera obter pela sua venda, quando a máquina ou o equipamento for retirado do serviço.

Investimento inicial

O investimento inicial ou valor de aquisição refere-se ao preço atual da máquina ou do equipamento, incluindo os acessórios essenciais e opcionais, acrescido de taxas, custo de entrega e demais custos relacionados à instalação e adaptação da máquina ou do equipamento no sistema.

Vida útil

A vida útil ou econômica é o período em que a máquina ou o equipamento pode operar com produtividade e custo operacional aceitáveis. A vida útil depende de dois fatores: prejuízos físicos e prejuízos funcionais. Os prejuízos físicos são causados pela deterioração normal, uso, desgaste, corrosão, abrasão, decomposição química, impacto, colisão, etc. Os prejuízos físicos podem resultar tanto do uso normal e adequado, como do uso abusivo e inadequado, falta de manutenção ou condições ambientais adversas. Os prejuízos funcionais referem-se à capacidade da máquina ou do equipamento atingir a demanda de operação ou adequar-se a mudanças no sistema. Geralmente ocorrem quando a máquina ou o equipamento se torna tecnologicamente obsoleto. A vida útil pode ser estimada com base em experiência pessoal, registros de usuários e proprietários e informações de fabricantes.

Valor de revenda

O valor de revenda é definido como a quantia pela qual a máquina ou o equipamento pode ser vendido no momento em que for retirado do serviço. O valor de revenda é afetado pela demanda do mercado por máquinas e equipamentos usados e pelas condições da máquina ou do equipamento no momento da venda. Estimar o valor de revenda é muito difícil porque ele é baseado no mercado futuro e nas condições desconhecidas da máquina ou do equipamento no momento da venda. As estimativas vêm de proprietários, fabricantes e revendedores. Como regra geral, Miyata (1980) recomenda que o valor de revenda seja estimado em 20% do investimento inicial.

O método mais usado para o cálculo da depreciação é o linear. O método linear de estimativa da depreciação assume que o valor da máquina ou do equipamento diminui a uma taxa constante a cada ano da sua vida útil. A depreciação linear é estimada pela seguinte equação:

$$d = \frac{VA - VR}{n}$$

Onde:

d = depreciação anual;

VA = valor de aquisição da máquina ou do equipamento (investimento inicial);

VR = valor de revenda da máquina ou do equipamento após a vida útil ou econômica;

n = vida útil ou econômica, expressa em anos.

1.2. Juros, seguros e impostos

Os juros correspondem ao custo de investimento do capital durante um determinado período de tempo. Se o capital for emprestado, a taxa de juros é definida pelo responsável do empréstimo. Se o capital for proveniente de economias, a taxa de juros corresponde ao custo de oportunidade de outro investimento deste capital. O custo dos juros é estimado aplicando-se a taxa anual de juros, expressa em porcentagem, ao investimento médio anual. Além dos juros, os seguros e os impostos também são estimados a partir da aplicação de um percentual ao investimento médio anual (IMA), calculado pela seguinte equação:

$$IMA = \left(\frac{(VA - VR) \cdot (n + 1)}{2 \cdot n} \right) + VR$$

Onde:

IMA = investimento médio anual;

VA = valor de aquisição da máquina ou do equipamento;

VR = valor de revenda da máquina ou do equipamento após a vida útil ou econômica;

n = vida útil ou econômica, expressa em anos.

O conceito do IMA vem da teoria da progressão aritmética e é aplicável somente quando se usa o método de depreciação linear.

A progressão aritmética é uma sequência de números, onde uma constante determina a comum diferença entre eles. Assim, a diferença entre dois termos sucessivos é igual a essa constante. Por exemplo, a sequência 1, 3, 5, 7, 9 é uma progressão aritmética de cinco termos, que tem como constante 2. Então, se o primeiro termo e a constante são conhecidos, pode-se determinar o enésimo termo de uma progressão aritmética pela seguinte equação:

$$P_n = P_1 + (n - 1) \cdot d \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

P_n = enésimo termo

P_1 = primeiro termo

d = constante

A soma dos termos de uma progressão aritmética, entre o primeiro e o enésimo termo, também pode ser determinada, por meio da seguinte equação:

$$S_n = \frac{n}{2} \cdot (P_1 + P_n) \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

S_n = soma dos termos (primeiro + n termos)

P_n = enésimo termo

P_1 = primeiro termo

Então, substituindo a equação (1) na equação (2), tem-se:

$$S_n = \frac{n}{2} \cdot (P_1 + P_1 + (n - 1) \cdot d)$$

$$S_n = \frac{n}{2} \cdot (2 \cdot P_1 + (n - 1) \cdot d) \quad (\text{equação 3})$$

A equação (3) pode ser transformada em IMA, uma vez que P1 é o valor de aquisição da máquina (VA) e a constante d é a depreciação linear da máquina. Então, tem-se a seguinte dedução:

$$\begin{aligned}
 S_n &= \frac{n}{2} \cdot (2 \cdot P1 + (n-1) \cdot d) \\
 S_n &= \frac{n}{2} \cdot \left[(2 \cdot VA + (n-1) \cdot d) - \left(\frac{VA - VR}{n} \right) \right] \\
 S_n &= \frac{n}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot VA \cdot n - VA \cdot n + VA + VR \cdot n - VR}{n} \right) \\
 S_n &= \frac{VA \cdot n + VA + VR \cdot n - VR}{2} \\
 S_n &= \frac{VA \cdot n + VA - VR \cdot n - VR + 2VR \cdot n}{2} \\
 S_n &= \frac{VA \cdot (n+1) - VR \cdot (n+1) + 2VR \cdot n}{2} \\
 S_n &= \left(\frac{VA \cdot (n+1) - VR \cdot (n+1) + 2VR \cdot n}{2} \right) \div n \\
 S_n &= \left(\frac{VA \cdot (n+1) - VR \cdot (n+1) + 2VR \cdot n}{2 \cdot n} \right) \\
 S_n &= \left(\frac{VA \cdot (n+1) - VR \cdot (n+1)}{2 \cdot n} \right) + \frac{2 \cdot VR \cdot n}{2 \cdot n} \\
 S_n = IMA &= \left(\frac{(VA - VR) \cdot (n+1)}{(2 \cdot n)} \right) + VR
 \end{aligned}$$

2. CUSTOS OPERACIONAIS

Os custos operacionais variam proporcionalmente com as horas de operação ou uso da máquina ou do equipamento. Incluem reparos, manutenção, peças, consumo de combustível e lubrificação.

Manutenção e reparos

Os custos com manutenção e reparos são os mais imprevisíveis de todos os custos de máquinas e equipamentos (BRINKER et al., 2002). Incluem desde os custos com revisões periódicas programadas, manutenções preventivas e corretivas, e pequenos reparos, incluindo peças e mão-de-obra. Brinker et al. (2002) sugerem que os custos com substituição de pneus e esteiras também sejam incluídos nos custos de manutenção e reparos.

Experiências de proprietários com máquinas e equipamentos similares em condições típicas de trabalho são boas fontes de informação para a estimativa desses custos. Na falta de informação, Miyata (1980) sugere que esses custos sejam estimados por um percentual do custo anual de depreciação da máquina ou do equipamento. Diversos autores sugerem tabelas com percentuais do custo anual de depreciação para estimativas de custo de manutenção e reparos de máquinas e equipamentos, entre eles Miyata (1980), Cubbage (1981) e Brinker et al. (2002).

Combustível

O custo com combustível é calculado a partir da quantidade de combustível consumida e do preço unitário local do combustível. O consumo depende do tipo de máquina, da potência do motor, da intensidade e das condições de uso, entre outros fatores. Se o consumo não for conhecido, Miyata (1980) recomenda que seja estimado a partir da seguinte equação (para motores a diesel):

$$\text{Consumo (L/h)} = \frac{181,44 \times 0,65}{848,36} \times \text{hp} = 0,139 \times \text{hp}$$

Onde:

181,44 = Peso do diesel (gramas) consumido por hp-hora.

0,65 = Razão entre a média da potência utilizada e a potência disponível.

848,36 = Peso do diesel (gramas) por litro.

hp = potência do motor.

Lubrificantes

O custo com lubrificantes inclui os gastos com graxas e óleos (motor, transmissão, hidráulico, filtros, etc.). O consumo de lubrificantes pode ser estimado como percentual do custo com combustível, uma vez que os fatores que afetam o consumo de combustível (tipo de máquina, potência, intensidade e condições de uso) também determinam a quantidade de lubrificantes consumida (BRINKER et al., 2002). Plummer e Stokes (1983) sugerem a taxa de 36,8% do custo horário com combustível para estimar o custo com lubrificantes.

3. CUSTOS COM MÃO-DE-OBRA

O custo com mão-de-obra envolve todos os custos necessários para manter o operador empregado e trabalhando. Inclui salário, encargos sociais, benefícios, transporte, uniforme, equipamentos de proteção individual.

REFERÊNCIAS

BRINKER, R. W.; KINARD, J.; RUMMER, B.; LANFORD, B. **Machine rates for selected forest harvesting machines**. Auburn, AL, US: Alabama Agricultural Experiment Station, 2002. 29 p. (Circular 296).

CUBBAGE, F. W. **Machine rate calculations and productivity rate tables for harvesting southern pine**. St. Paul, MN, US: Department of Forest Resources, University of Minnesota, 1981. 120 p. (Staff Paper Series 24).

MIYATA, E.S. 1980. **Determining fixed and operating costs of logging equipment**. St. Paul, MN, US: USDA Forest Service, 1980. 16 p. (Gen. Tech. Report NC-55).

PLUMMER, G; STOKES, B. **Petroleum product consumption estimators for off-highway forest operations**. Washington, DC, US: Southwide Energy Committee, 1983. 10 p. (APA Tech. Paper. 83-A-12).